



Miguel Macedo Estêvão

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Durabilidade de varões de GFRP para reforço de elementos de betão armado

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Professor Doutor Manuel A. J. Gonçalves da Silva
Co-orientador: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João C. Gomes Rocha de Almeida
Arguente: Prof. Doutor Carlos M. Chastre Rodrigues
Vogal: Prof. Doutor Manuel A. J. Gonçalves da Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2017

“Copyright” Miguel Macedo Estêvão, da FCT/UNL e da UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Ao Professor Manuel Gonçalves da Silva pelos conhecimentos que me facultou durante a dissertação. Concedeu e interagiu com contactos importantes que ajudaram no desenvolvimento da dissertação. Foi um privilégio desenvolver este trabalho sob a sua dedicada orientação.

Ao Professor Fernando Pinho pelos conselhos e incentivos durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço todo o empenho e conhecimentos transmitidos na elaboração da campanha experimental, nomeadamente na preparação dos corpos de prova para os ensaios de tração. Foi com grande gosto que desenvolvi este trabalho sob a sua atenta orientação.

Aos Técnicos Sr. José Gaspar e Dr. Jorge Silvério pela assistência assídua em todos os trabalhos em laboratório em que necessitei apoio. O seu contributo foi muito importante, muito obrigado.

Ao Eng.º Vítor Silva pelos conselhos e assistência, em especial no ensaio de porosidade realizado no Departamento de Engenharia Civil.

À SECIL S.A., em particular à Eng^a Dina Frade pelo fornecimento gratuito da calda *REABILTA Cal Inject* e à Eng^a Ângela Nunes, à Eng^a Diana Correia, ao Eng.º Pedro Gago, ao Eng.º Jorge Galvão e ao Eng.º Vítor Vermelhudo pelo esforço na realização de análises químicas da composição do betão, contribuindo para o estudo deste trabalho.

À LUSICAL, companhia Lusitana de Cal S.A., em especial ao Dr. Mário Marques pela prestável colaboração na realização de análises da composição química do betão, contribuindo desta forma para uma melhor compreensão da composição do material.

À PARALAB, Equipamentos Industriais e de Laboratório, S.A., em especial à Dr.^a Ana Margarida Assunção que forneceu grande parte das análises SEM de forma gratuita. Sem esta ajuda, este trabalho não teria sido possível.

Ao LNEG, em particular à Dr.^a Teresa Diamantino e à Eng^a Teresa Ferraz por disponibilizarem as instalações onde se realizaram os ensaios de impacto. Agradeço todo o tempo despendido que muito contribuiu para que este trabalho fosse possível.

Ao IPS/ESTB, por disponibilizar as instalações do Laboratório de Materiais de Construção, em especial ao Técnico Sr. Alexandre Gamito pelo importante auxílio prestado nos ensaios de tração.

Ao Departamento de Ciências da Terra da FCT, em particular à Dr.^a Maria Eduarda Ferreira pelo apoio prestado na utilização do equipamento de corte e de moagem usado nas amostras de calda e de betão.

Ao Departamento de Conservação e Restauro da FCT, em particular à Professora Márcia Vilarigues e ao Professor Miguel Silva pelo apoio na análise FRX e calcinação dos materiais. Agradeço a boa vontade e disponibilidade que o Professor Miguel Silva teve sempre comigo.

Ao CENIMAT, em especial ao Professor Rui Silva pela eficiência e conhecimento que transmitiu sobre métodos de corte e polimento nas amostras GFRP necessárias para análise em SEM.

Ao Departamento de Química, laboratório REQUIMTE, em particular ao Dr. Nuno Costa pela ajuda e esforço na execução das análises de porosimetria de mercúrio e conhecimento teórico que transmitiu sobre a técnica, contribuindo para o melhor conhecimento das propriedades físicas do betão e calda utilizados no trabalho.

Ao INEGI, em particular ao Dr. Nuno Rocha pelo apoio e execução dos ensaios de determinação de temperatura de transição vítrea, contribuindo desta forma com o enriquecimento da caracterização do material de GFRP.

À S&P Clever Reinforcement Iberica Lda, em especial Eng.º Filipe Dourado por facultar a resina, sem qualquer contrapartida, utilizada nos trabalhos de preparação dos corpos de prova a ensaiar à tração.

Aos meus amigos, pelo suporte ímpar e bons momentos que proporcionaram.

À minha namorada, pela sua presença e apoio constante, pois sem ela seria tudo mais difícil.

À minha família, pela educação, pelos valores transmitidos e por me acompanharem sempre ao longo deste caminho.

Resumo

A análise de parâmetros como a durabilidade dos varões de GFRP é fundamental para a visibilidade económica da sua utilização e para o conhecimento do comportamento do material.

Pretendeu-se, neste trabalho, analisar a degradação das características químicas, físicas e mecânicas dos varões de fibra de vidro, sem e com recobrimento, submetidos a ambientes agressivos. Os principais parâmetros estudados foram: a contaminação física dos varões de GFRP e respetivos recobrimentos; as propriedades mecânicas dos varões de GFRP degradados.

Foi desenvolvido um programa experimental que contempla: a preparação de soluções que simulam ambientes agressivos; o estudo de difusão das soluções através dos varões sem e com recobrimento durante o período de contaminação; análise da evolução da penetração dos elementos químicos constituintes das soluções nas fibras de vidro e na matriz, através de microscópio eletrónico; obtenção de módulos de elasticidade e energia absorvida dos varões de GFRP através de ensaios de tração e de ensaios de impacto respetivamente. Este programa tem como objetivo comparar resultados obtidos dos varões expostos aos diversos ambientes agressivos com os de referência para detetar a degradação do material e as consequências para a vida útil das estruturas.

Na análise de resultados foi possível observar alteração das propriedades físicas da calda e do betão, devido à acomodação de sais cristalizados na estrutura porosa após absorção das soluções a que estiveram expostos. Os resultados mostram uma degradação da resina periférica do varão de GFRP mais acentuada à exposição do ambiente alcalino. Os resultados indicam também uma perda significativa de propriedades mecânicas dos varões de GFRP através dos ensaios de impacto realizados, sobretudo nos varões expostos ao ambiente alcalino.

Palavras-Chave: Compósitos, GFRP, ambiente alcalino, durabilidade.

Abstract

The analysis of parameters such as the durability of the GFRP rods is fundamental for the economic feasibility of their use and for the knowledge of the behavior of the material.

The aim of this work was to analyze the degradation of the chemical, physical and mechanical characteristics of glass fiber bars, without and with mortar cover, subjected to aggressive environments, considering the contamination of GFRP rods; and the changes of their mechanical properties.

An experimental program was developed that includes: the preparation of solutions that simulate aggressive environments; the study of diffusion of the solutions through the rods without and with mortar cover during the period of contamination; the analysis of the evolution of the penetration of the chemical constituents of the solutions in the glass fibers and in the matrix, through a scanning electron microscope; obtaining elastic modulus and energy absorbed from GFRP rods by tensile tests and impact tests respectively. The aim of this program is to compare the results obtained from the rods exposed to the various aggressive environments with those that were not contaminated to detect the degradation of the material and the consequences for the life cycle of the structures.

In the analysis of results it was possible to observe changes in the physical properties of the concrete and grout due to the crystallized salts in the porous structure after absorption of the solutions to which they were exposed. The results show a degradation of the peripheral resin of the GFRP rods more accentuated for the exposure to alkaline environment. The results also indicate a significant loss of mechanical properties of the GFRP rods through the impact tests performed, especially in the rods exposed to the alkaline environment.

Keywords: Composites, GFRP, alkaline environment, durability.

Índice de texto

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivos e metodologia da dissertação	3
1.3. Organização da dissertação.....	4

Capítulo 2 – Enquadramento do tema

2.1. Considerações iniciais.....	5
2.2. Caracterização dos GFRP	5
2.3. Aspectos de durabilidade dos GFRP	8
2.3.1. Desempenho de GFRP sujeitos a ambientes agressivos	9
2.3.2. Metodologias e análise de resultados experimentais	12

Capítulo 3 – Trabalho experimental

3.1. Considerações Iniciais	19
3.2. Descrição dos materiais	19
3.2.1. Varões de GFRP	19
3.2.2. Calda <i>REABILITA Cal Inject</i>	20
3.2.3. Betão	20
3.2.4. Resina	21
3.3. Preparação das amostras e ambientes de exposição/trabalho	22
3.3.1. Varões de GFRP	22
3.3.2. Provetes cilíndricos de calda com varões de GFRP embutidos	23
3.3.3. Provetes cilíndricos de betão com varões de GFRP	25
3.3.4. Ambientes de exposição/trabalho	25
3.4. Realização e apresentação de resultados de ensaios	27

3.4.1. Caracterização física dos varões de GFRP, betão e calda	27
3.4.1.1. Difusão molecular das soluções nas amostras	28
3.4.1.2. Ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX).....	34
3.4.1.3. Ensaio de determinação de massa volúmica aparente e porosidade aberta	38
3.4.1.4. Ensaio de porosimetria de mercúrio.....	40
3.4.1.5. Microscópio eletrónico de varrimento	44
3.4.1.6. Ensaio de calcinação.....	54
3.4.2. Caracterização mecânica dos varões de GFRP	57
3.4.2.1. Ensaio para determinação de temperatura de transição vítrea através de análise mecânica dinâmica (DMA)	57
3.4.2.2. Ensaio de tração dos varões de GFRP	59
Sistema porticado	59
Máquina de ensaio	61
3.4.2.3. Ensaio de impacto de tipo Charpy.....	65

Capítulo 4 – Discussão de resultados

4.1. Considerações iniciais.....	69
4.2. Caracterização física dos varões de GFRP, calda e betão	69
4.2.1. Difusão molecular das soluções nas amostras.....	69
4.2.2. Ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)	73
4.2.3. Ensaio de determinação de massa volúmica aparente e porosidade aberta	75
4.2.4. Ensaio de porosimetria de mercúrio	75
4.2.5. Microscópio eletrónico de varrimento (SEM)	79
4.2.6. Ensaio de calcinação	85
4.3. Propriedades mecânicas dos varões de GFRP	86
4.3.1. Ensaio para determinação de temperatura de transição vítrea através de análise mecânica (DMA).....	86
4.3.2. Ensaio de tração	87
4.3.3. Ensaio de impacto de tipo Charpy	89

Capítulo 5 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Conclusões.....	91
5.2. Desenvolvimentos futuros	92

Referências bibliográficas	93
---	----

Anexos

Anexo A – Características dos varões de GFRP	99
Anexo B – Ficha técnica do calda <i>REABILITA Cal Inject</i>	101
Anexo C – Ficha técnica <i>S&P Resin 55</i>	105
Anexo D – Análise da composição química do betão – pela empresa Lusical S.A.....	109
Anexo E – Análise da composição química do betão – pela empresa Secil S.A.	115
Anexo F – Parâmetros do penetrómetro	119
Anexo G – Imagens SEM das amostras de GFRP	121
Anexo H – Dimensionamento de placas e cunhas para sistema porticado.....	125
Anexo I – Instruções de utilização do equipamento Wolpert	127

Índice de figuras

Figura 1.1 – Materiais em GFRP.....	1
Figura 1.2 – Eye Catcher, Basileia, Suíça.....	2
Figura 1.3 – Reparação da ponte Elkhorn North Bridge Village of Washington, Nebraska, EUA.....	2
Figura 1.4 – Varão de GFRP	3
Figura 2.1 – Esquematização da técnica de pultrusão para produção de compósitos de fibras de vidro....	6
Figura 2.2 – Ensaio de tração dos varões de GFRP	6
Figura 2.3 – Malha de compósitos de fibra de vidro para reforço de parede	8
Figura 2.4 – Secção transversal exposta ao ambiente alcalino a 60°C durante 4600 horas	12
Figura 2.5 – Modo de rotura típico nos varões de GFRP	13
Figura 2.6 – Varões de GFRP	14
Figura 2.7 – Modo de rotura do varão de GFRP	14
Figura 2.8 – Imagens SEM das secções transversais dos varões de GFRP	16
Figura 3.1 – Geometria da superfície do varão de GFRP (enrolamento em espiral)	19
Figura 3.2 – <i>REABILITA Cal Inject</i>	20
Figura 3.3 – Curvas granulométricas dos agregados constituintes do betão	21
Figura 3.4 – Resina <i>S&P Resin 55</i>	22
Figura 3.5 – Vedação dos topos dos varões de GFRP com silicone.....	22
Figura 3.6 – Varões de GFRP a submergir nos ambientes de exposição	23
Figura 3.7 – Procedimentos de preparação do provete de calda	24
Figura 3.8 – Provetes de betão com varões de GFRP	25
Figura 3.9 – Colocação dos varões de GFRP nas soluções que representam ambientes agressivos	26
Figura 3.10 – Imersão dos provetes de calda e betão com varão de GFRP nas 3 soluções do caso de estudo.....	27

Figura 3.11 – Ganho de massa acumulado para varões de GFRP submersos nos ambientes de exposição ...	30
Figura 3.12 – Ganho de massa acumulado para provetes cilíndricos de calda submersos nos ambientes de exposição.....	31
Figura 3.13 – Ganho de massa acumulado para provetes cilíndricos de betão submersos nos ambientes de exposição.....	32
Figura 3.14 – Equipamento de espectrometria de fluorescência de raios X ARTAX Burkert.....	34
Figura 3.15 – Recolha das amostras em pó de calda e do betão	35
Figura 3.16 – Amostras de calda e de betão utilizadas no ensaio para determinação de porosidade aberta e massa volúmica aparente	38
Figura 3.17 – Procedimentos de ensaio para determinação de massa volúmica aparente e porosidade aberta	39
Figura 3.18 – Porosímetro de mercúrio Micromeritics modelo AutoPore IV 9500	40
Figura 3.19 – Procedimentos de ensaio de porosimetria de mercúrio	41
Figura 3.20 – Gráficos de intrusão incremental em função do diâmetro do poro das amostras de calda submersas 5800 horas nos ambientes de exposição	42
Figura 3.21 – Gráficos de intrusão incremental em função do diâmetro do poro das amostras de calda com pré-tratamento de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição.....	43
Figura 3.22 – Gráficos de intrusão incremental em função do diâmetro do poro das amostras de betão submersas 5800 horas nos ambientes de exposição	43
Figura 3.23 – Gráficos de intrusão incremental em função do diâmetro do poro das amostras de betão com pré-tratamento de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição.....	44
Figura 3.24 – Procedimentos de corte nas amostras de GFRP para análise SEM	45
Figura 3.25 – Polimento das amostras de GFRP para análise SEM	46
Figura 3.26 – Equipamento SEM Phenom ProX	47
Figura 3.27 – Imagens SEM de amostras de GFRP sem recobrimento de referência e expostas ao ambiente alcalino durante 4500 e 8400 horas	48
Figura 3.28 – Imagens SEM de amostras de GFRP com recobrimento de calda expostas ao ambiente alcalino durante 2500 e 5800 horas	49
Figura 3.29 – Imagens SEM de amostras de GFRP com recobrimento de betão expostas ao ambiente alcalino durante 2500 e 5800 horas	50
Figura 3.30 – Equipamentos utilizados no ensaio de calcinação	54
Figura 3.31 – Amostras de GFRP para ensaio de calcinação	55
Figura 3.32 – Procedimentos de ensaio de calcinação	56
Figura 3.33 – Equipamento de ensaio de DMA	57

Figura 3.34 – Amostra de varão de GFRP para ensaio DMA.....	58
Figura 3.35 – Gráficos de Tan Delta em função da temperatura das amostras de varão de GFRP de referência e submersas nos ambientes de exposição	58
Figura 3.36 – Sistema porticado e seus componentes	60
Figura 3.37 – Equipamento SERVOSIS MUE 404/60	61
Figura 3.38 – Corpos de prova para ensaio de tração sem abraçadeiras de aperto.....	62
Figura 3.39 – Corpos de prova para ensaio de tração com abraçadeiras de aperto de 5 cm de altura	63
Figura 3.40 – Corpos de prova para ensaio de tração com abraçadeiras de aperto de 8 cm de altura	63
Figura 3.41 – Módulos de elasticidade dos varões de GFRP ensaiados	64
Figura 3.42 – Curvas de tensão/deformação dos corpos de prova ensaiados.....	64
Figura 3.43 – Pêndulo TINIUS OLSEN Modelo - IT 503.....	65
Figura 3.44 – Equipamentos utilizados no ensaio de impacto.....	66
Figura 3.45 – Amostra de GFRP utilizada no ensaio de impacto	66
Figura 3.46 – Modos de rotura das amostras de GFRP de referência e submersas 5300 horas nos ambientes de exposição.....	68
 Figura 4.1 – Gráficos de ganho de massa ao longo do tempo de varões de GFRP nos diferentes ambientes... 71	
Figura 4.2 – Gráficos de ganho de massa ao longo do tempo de varões de GFRP de Ø25 protegidos por calda ou betão.....	72
Figura 4.3 – Concentração dos elementos químicos no recobrimento de calda, L = 1 cm	73
Figura 4.4 – Concentração dos elementos químicos no recobrimento de betão, L = 1cm	74
Figura 4.5 – Porosidade de amostras de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição.....	76
Figura 4.6 – Diâmetro médio do poro das amostras de calda de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição.....	77
Figura 4.7 – Diâmetro médio do poro das amostras de betão de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição.....	78
Figura 4.8 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na fibra de vidro dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente salino em pontos seleccionados ...	79
Figura 4.9 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na resina dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente salino em pontos seleccionados.....	80
Figura 4.10 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na fibra de vidro dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente alcalino em pontos seleccionados.....	81

Figura 4.11 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na resina dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente alcalino em pontos selecionados	82
Figura 4.12 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos nas fibras de vidro dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio em pontos selecionados.....	83
Figura 4.13 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na resina dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio em pontos selecionados.....	84
Figura 4.14 – Quantidade de resina viniléster nas amostras de GFRP em diferentes ambientes de exposição	85
Figura 4.15 – T_g das amostras de GFRP sujeitas aos ambientes de exposição	86
Figura 4.16 – Modos de rotura dos varões de GFRP no ensaio à tração	88
Figura 4.17 – Gráfico energia absorvida em função da área da secção resistente das amostras de GFRP.....	90
Figura G.1 – Imagens SEM de amostras de GFRP submersas no ambiente salino.....	121
Figura G.2 – Imagens SEM de amostras de GFRP sem e com recobrimento de calda submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio	122
Figura G.3 – Imagens SEM de amostras de GFRP com recobrimento de betão submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio	123
Figura H.1 – Placas de metal dimensionadas para sistema porticado	125
Figura H.2 – Cunhas metálicas dimensionadas para sistema porticado	126

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Resultados dos ensaios de tração dos varões de GFRP	13
Quadro 2.2 – Resultados da resistência à tração dos varões de GFRP	15
Quadro 2.3 – Resultados obtidos nos ensaios de tração dos varões de GFRP por vários autores após envelhecimento no ambiente alcalino	17
Quadro 3.1 – Composição do betão	21
Quadro 3.2 – Características mecânicas do betão aos 60 dias.....	21
Quadro 3.3 – Condições de preparação da calda	25
Quadro 3.4 – Composição das soluções	26
Quadro 3.5 – Número de varões de GFRP, provetes de calda e de betão com varão GFRP em cada solução	27
Quadro 3.6 – Coeficientes de difusão dos varões de GFRP	33
Quadro 3.7 – Coeficientes de difusão dos provetes de calda com varão de GFRP embutido.....	33
Quadro 3.8 – Coeficientes de difusão dos provetes de betão com varão de GFRP sobressaído	33
Quadro 3.9 – Amostras de calda e de betão recolhidas para ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X.	35
Quadro 3.10 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de calda de referência e submersas no ambiente salino.....	36
Quadro 3.11 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de calda de referência e submersas no ambiente alcalino.....	36
Quadro 3.12 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de calda de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio	36
Quadro 3.13 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de betão de referência e submersas no ambiente salino	37
Quadro 3.14 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de betão de referência e submersas no ambiente alcalino	37
Quadro 3.15 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de betão de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio.....	37

Quadro 3.16 – Valores de massa volúmica aparente e porosidade aberta da calda e do betão antes e após envelhecimento	38
Quadro 3.17 – Amostras utilizadas no ensaio de porosimetria de mercúrio	41
Quadro 3.18 – Parâmetros obtidos através do ensaio de porosimetria de mercúrio	42
Quadro 3.19 – Amostras de GFRP para análise SEM.....	47
Quadro 3.20 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP sem recobrimento de referência e submersas no ambiente salino	51
Quadro 3.21 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP sem recobrimento de referência e submersas no ambiente alcalino.....	51
Quadro 3.22 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP sem recobrimento de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio ...	51
Quadro 3.23 – Concentração percentual das moléculas dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de calda de referência e submersas no ambiente salino	52
Quadro 3.24 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de calda de referência e submersas no ambiente alcalino.....	52
Quadro 3.25 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de calda de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio	52
Quadro 3.26 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de betão de referência e submersas no ambiente salino	53
Quadro 3.27 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de betão de referência e submersas no ambiente alcalino	53
Quadro 3.28 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de betão de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio.....	53
Quadro 3.29 – Amostras de varão de GFRP utilizadas no ensaio	55
Quadro 3.30 – Percentagem de fibra de vidro e resina resultante de cada amostra de varão GFRP ...	56
Quadro 3.31 – Amostras de varão de GFRP ensaiadas através da técnica DMA	59
Quadro 3.32 – Configurações utilizadas nos varões de GFRP	62
Quadro 3.33 – Resultados obtidos no ensaio de impacto de tipo Charpy.....	67

Siglas e Símbolos

Siglas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEM II – Cimento Portland Tipo II.

CENIMAT – Centro de Investigação em Materiais

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DMA – Dynamic Mechanical Analysis

DTP – Distribuição de Tamanho de Poros

EN – European Standards

EUA – Estados Unidos da América

ESTB – Escola Superior de Tecnologia do Barreiro

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

FRP – Fiber Reinforced Polymer

FRX – Fluorescência de Raios X

GFRP – Glass Fiber Reinforced Polymer

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

IPS – Instituto Politécnico de Setúbal

ISO – International Organization for Standardization

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MEV – Microscópio Eletrónico de Varrimento

NP – Norma Portuguesa

REQUIMTE – Rede de Química e Tecnologia do Departamento de Química

SEM – Scanning Electron Microscope

UNL – Universidade Nova de Lisboa

Símbolos

α – Coeficiente de difusão

α_{m0} – Raízes para $J_0(\alpha_{m0}) = 0$

$\sigma_{cilindros}$ – Resistência do betão à compressão em cilindros

σ_{cubos} – Resistência do betão à compressão em cubos

$E_{t,aço}$ – Módulo de elasticidade em tração dos varões de aço

$E_{c,betão}$ – Módulo de elasticidade em compressão do betão

$E_{t,GFRP}$ – Módulo de elasticidade em tração dos varões de GFRP

J_0 – Funções de *Bessel* do primeiro e segundo tipo e ordem zero

M_m – Ganho de massa no final do segmento linear

M_{sat} – Ganho de massa máximo

$M(t)$ – Ganho de massa em função de t

M_1 – Ganho de massa para tempo t_1

M_2 – Ganho de massa para tempo t_2

R – Raio do cilindro

t – Tempo (a duração do ganho de massa)

t_1 – Primeiro registo de massa absorvida

t_2 – Segundo registo de massa absorvida

T_g – Temperatura de transição vítrea

Tan Delta – Tangente do ângulo obtido nos ensaios de DMA

Capítulo 1

Introdução

1.1. Considerações iniciais

A necessidade de rapidez de construção em aplicações da engenharia civil, em conjunto com os problemas de durabilidade de materiais tradicionais como o aço e o betão armado, têm contribuído para o desenvolvimento de novas soluções estruturais. Na atualidade, o sector de reabilitação na construção civil é muito importante e os materiais compósitos, como os materiais plásticos reforçados com fibras, são muito adequados na reparação e reforço de estruturas.

Os elevados custos de manutenção e reparação que hoje se fazem sentir em estruturas construídas com materiais tradicionais, devido aos problemas de durabilidade do aço e do betão armado, têm vindo a determinar a procura de alternativas viáveis na indústria da construção.

Assiste-se ao crescimento do interesse em novos materiais estruturais, mais resistentes à degradação ambiental, mais leves e que apresentam menores exigências de manutenção, mantendo as suas características resistentes. De entre essas soluções fazem parte os perfis pultrudidos de polímero reforçado (FRP) em geral, e os perfis pultrudidos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) em particular. Estes materiais estão a ter crescimento em termos de aplicações, devido a diversas vantagens relativamente aos materiais tradicionais, tais como: o baixo peso específico; a elevada relação entre a resistência e o seu peso; a facilidade de montagem e transporte; os baixos custos de manutenção ou mesmo a transparência eletromagnética. No entanto, o custo de utilização é ainda pouco competitivo na maioria das situações, sobretudo em construção nova.



(a) Tubagem de indústria corrosiva; (b) Tanques de armazenamento.

Figura 1.1 – Materiais em GFRP [1]

Relativamente à durabilidade, a utilização de materiais FRP em navios, tubagens de indústrias corrosivas, tanques de armazenamento e diversas aplicações das indústrias petrolíferas e de tratamento de águas residuais proporcionam evidência prática da boa durabilidade daqueles materiais em ambientes relativamente agressivos e corrosivos, Figura 1.1.

Desde 1940 que os materiais compósitos têm vindo a ganhar relevo e popularidade em diferentes campos da engenharia embora apenas a partir da década de 1980, tenha surgido um aumento nas aplicações destes materiais na indústria da construção, especialmente na reparação estrutural.

O primeiro edifício com estrutura inteiramente em perfis pultrudidos de GFRP foi o edifício Eye Catcher em Basileia, na Suíça (1999), Figura 1.2.



Figura 1.2 – Eye Catcher, Basileia, Suíça [2]

A ponte Elkhorn North Bridge Village of Washington em Nebraska, Estados Unidos da América (2015) foi sujeita a reparações estruturais, onde foram aplicados no tabuleiro varões de GFRP em vez dos varões de aço tradicionais, Figura 1.3.



Figura 1.3 – Reparação da ponte Elkhorn North Bridge Village of Washington, Nebraska, EUA [3]

Os varões de GFRP (plásticos reforçados com fibras de vidro) são materiais compósitos constituídos por fibras de vidro dispostas essencialmente de modo unidirecional, embebidas numa matriz que geralmente é constituída por viniléster ou poliéster insaturado e enquadram-se no grupo de materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP), Figura 1.4.



Figura 1.4 – Varão de GFRP

Nos últimos anos, a temática da durabilidade e compreensão dos fenómenos de degradação destes materiais tem vindo a ganhar relevo, procurando-se a caracterização destes materiais sob condições adversas a curto e longo prazo.

A motivação do estudo desenvolvido sobre o tema da dissertação é acrescentar resultados e conclusões à existente literatura de investigação, de forma a expandir e contribuir para o conhecimento dos varões de GFRP.

Apresentam-se os resultados de um projeto de investigação sobre alterações físicas, químicas, e mecânicas sofridas por varões de GFRP, constituídos por matrizes de viniléster, e respetivos recobrimentos de calda e de betão, após degradação acelerada do ambiente salino, alcalino e sulfatos e cloretos de sódio. Em baixo são apresentados os objetivos, a metodologia e a organização da dissertação.

1.2. Objetivos e metodologia da dissertação

Os objetivos principais deste trabalho são os de analisar a durabilidade dos varões de GFRP em ambientes de contaminação severa e identificar a degradação resultante a partir do conhecimento das alterações de características químicas, físicas, e mecânicas dos materiais. Para se atingir estes objetivos destacam-se os seguintes passos:

- Revisão bibliográfica sobre a durabilidade de varões de GFRP usado no reforço de estruturas de betão;
- Realização dos ensaios experimentais antes e após contaminação dos materiais, com apoio de várias entidades: estudo da difusão molecular a partir do registo de ganhos de massa dos provetes submersos nos ambientes de exposição; ensaios de porosidade e porosimetria da calda e do betão;

análise química da calda e do betão através de ensaios FRX; análise realizada em SEM às amostras de GFRP; ensaios DMA a amostras de GFRP; ensaios mecânicos de tração nos varões de GFRP de referência; ensaio de impacto baseado no método Charpy nas amostras de GFRP;

- Análise dos resultados obtidos durante os ensaios: efeito que a exposição a ambientes agressivos tem nas propriedades e/ou comportamento dos varões de GFRP e das estruturas reforçadas com esses varões; calculo das perdas quantitativas de algumas das características dos materiais contaminados em relação aos de referência, em particular, a capacidade de absorção de energia em ensaios de impacto.
- Apresentação das principais conclusões relativas aos ensaios efetuados e apresentação de sugestões de estudos a desenvolver no futuro.

1.3. Organização da dissertação

O trabalho apresentado está organizado em 5 capítulos que representam as várias etapas deste estudo.

Capítulo 1 – São feitas considerações iniciais sobre o tema em análise, realçando a importância deste estudo e os objetivos definidos para a realização do mesmo. Define-se também a metodologia e a organização.

Capítulo 2 – É efetuada uma pesquisa sobre a durabilidade dos GFRP face a ambientes agressivos. São apresentadas aplicações históricas e atuais do material compósito.

Capítulo 3 – É descrito o programa experimental efetuado, a caracterização dos materiais utilizados, a preparação dos provetes de GFRP com e sem recobrimento e feita a simulação dos ambientes agressivos através da preparação das soluções aquosas. A difusão molecular das soluções será analisada na campanha experimental. São descritos os procedimentos de ensaio, o funcionamento dos equipamentos de instrumentação e aquisição de dados utilizados.

Capítulo 4 – Realiza-se a discussão dos resultados obtidos. São apresentados figuras e gráficos que mostram o comportamento dos varões de GFRP e respetivos recobrimentos antes e após sofrerem degradação.

Capítulo 5 – Apresentam-se as conclusões resultantes do estudo realizado. Apresenta-se uma reflexão dos resultados analisados e uma discussão sobre a concretização dos objetivos propostos. São também apresentadas recomendações para estudos a realizar no futuro na mesma área.

Todas as figuras não referenciadas são da responsabilidade do autor.

Capítulo 2

Enquadramento do tema

2.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são abordados a caracterização e aspetos de durabilidade dos GFRP, dentro dos quais é tratado o desempenho dos GFRP sujeitos a ambientes agressivos, assim como, metodologias e análise de resultados experimentais.

2.2. Caracterização dos GFRP

O aparecimento da fibra de vidro surge da constante procura de materiais com melhores propriedades e remonta ao século XIX, mais precisamente a 1836. Nesse ano foi desenvolvida e patenteada na Europa uma forma de tecer vidro maleável de finíssimos filamentos. Esta data não é consensual, pois existem diversos autores que indicam diferentes datas para o aparecimento da fibra de vidro [4].

Só passado cerca de um século é que a fibra de vidro começou a ser produzida em massa e isso ocorreu por acidente, quando um pesquisador da *Owens-Illinois* projetou um jato de ar comprimido para o local onde estava vidro fundido e produziu fibras. Alguns anos depois e com o aparecimento de resinas, como o caso da resina de poliéster, consegue-se que a fibra de vidro e as resinas se tornem num material compósito. Esta combinação potenciou o uso comercial deste material dadas as suas boas características mecânicas, baixa relação densidade/resistência e resistência à corrosão.

A fibra de vidro teve uma aplicação generalizada, essencialmente na aviação e na indústria náutica, sendo a indústria da aviação a que promoveu bastante pesquisa e desenvolvimento na procura de resultados de materiais usando fibras de vidro e outros tipos de fibras. Ainda durante a 2ª Guerra Mundial foi testado um avião de combate em fibra de vidro. Na atualidade, a fibra de vidro é usada em várias indústrias, por exemplo em peças para automóveis e aviões, cascos e hélices para barcos, tanques de água, tubos, componentes aeroespaciais, placas de montagem de circuitos elétricos e materiais de construção civil [5,6].

As fibras de vidro ao serem impregnadas numa resina formam um material compósito (GFRP). Este material compósito é normalmente constituído por uma matriz polimérica, que agrega as fibras, absorve as deformações e confere resistência ao compósito quando em compressão. O material compósito pode ter características diferentes dependendo do tipo de resina usado, da forma e disposição das fibras [6]. Geralmente, as resinas usadas são viniléster ou epóxi. Os compósitos de fibra de vidro

destacam-se pela sua elevada resistência à tração (dependendo do sentido do arranjo das fibras e da resina usada).

Os plásticos reforçados com fibras de vidro (GFRP) são obtidos através da técnica de pultrusão, processo de fabrico contínuo de perfis constituídos por fibras e resinas termoendurecidas ou termoplásticas, que consiste em esticar as fibras de vidro embebidas na resina, obtendo a forma do perfil através de um molde. O aquecimento do molde provoca a polimerização, isto é, a cura da resina durante a passagem do seu interior, Figura 2.1. A partir do processo de fabrico, é possível obter varões e laminados de GFRP [7].



Figura 2.1 – Esquematização da técnica de pultrusão para produção de compósitos de fibras de vidro [7]

As fibras de vidro têm como desvantagem a pouca resistência aos esforços em corte, isto porque as finíssimas fibras de vidro quando solicitadas em corte entram em rotura com facilidade. Além disso, quando são comprimidas perpendicularmente ao seu sentido longitudinal, elas tendem a desagregar-se por rotura da resina que as envolve. Nos ensaios de tração, utilizam-se proteções nas extremidades dos varões de GFRP de maneira a proteger dos efeitos das garras de aperto do sistema, Figura 2.2.

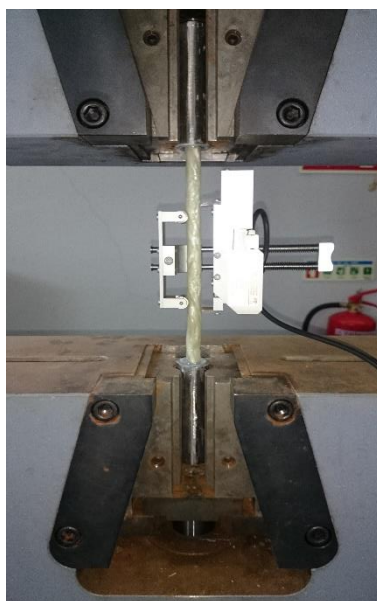


Figura 2.2 – Ensaio de tração dos varões de GFRP

Outra desvantagem é o facto dos compósitos de fibra de vidro serem pouco rígidos (no caso dos varões produzidos pelo fabricante *Fyfe Co. LLC* $E_{t,GFRP} = 43$ GPa) quando comparados, por exemplo, com o aço ($E_{t,aço} = 210$ GPa). Além disso, são sensíveis à abrasão, a temperaturas elevadas, a resistência à fadiga é baixa e são prejudiciais para a saúde quando se executam cortes no material.

Contudo, existem diversas vantagens dos GFRP, tais como: alta resistência à corrosão e ataques químicos, que proporciona uma maior durabilidade do material e permite uma redução do recobrimento nos elementos estruturais; inexistência de condutibilidade elétrica, cargas elétricas e magnetismo; elevada resistência à tração; baixo custo relativamente às outras fibras.

O uso das fibras de vidro na indústria da construção tem vindo a crescer devido às boas características físicas e químicas, o que se traduz num bom comportamento durante a vida útil da estrutura. Um dos grandes problemas que as estruturas de betão armado têm apresentado é a corrosão do aço, principalmente em ambientes agressivos onde a penetração de cloretos e a carbonatação acabam por reduzir o tempo de serviço do edifício, conduzindo à necessidade de intervenções estruturais demoradas e cuidadosas, que trazem custos elevados de manutenção ou substituição.

Em relação à aplicação dos GFRP, são apropriados em ambientes favoráveis à corrosão mesmo com pouco recobrimento: garagens enterradas, infraestrutura e superestrutura de pontes, revestimentos finos de fachadas, obras hidráulicas, pavimentos industriais, reservatórios, estações de águas residuais e estacas. São utilizados em paredes de túneis, ancoragens e estruturas temporárias e adequados para instalação de edifícios de investigação médica onde é necessária a calibração de equipamentos de alta voltagem, em áreas próximas de sensores de semáforos de trânsito, instrumentos sensíveis, construção ecológica e salas de explosivos. São aplicados nas estruturas em geral, estruturas temporárias e reforço adicional para condições de cargas extraordinárias.

O uso de fibra de vidro em forma de varões em estruturas de betão armado, como os produzidos pelo fornecedor *Fyfe Co. LLC*, oferece uma alternativa sem problemas de corrosão. Deste modo, estas estruturas terão menos intervenções durante o seu tempo de serviço e têm, consequentemente, menores custos de manutenção ou reparação. Além do bom comportamento em termos de durabilidade, os varões de fibra de vidro têm uma elevada capacidade resistente, sendo, no caso destes varões, a tensão de rotura à tração na ordem dos 850 MPa.

A fibra de vidro pode também ser usada como um material de reforço de estruturas, seja na fase de construção ou durante o período de vida da estrutura. Na fase de construção, pode ser necessário quando existem erros de projeto, erros de execução ou até erros na produção do betão. Devido a estes erros os elementos estruturais podem ter uma resistência inferior à necessária ou não cumprirem os estados limites de utilização, havendo necessidade de reforçar a estrutura. À semelhança da fase de construção, no período de vida da estrutura também pode ser necessário reforçar, seja pela debilidade que a estrutura apresenta, que pode ser provocada por sismos ou acidentes (choques, incêndios) ou até por necessidades de reforço com vista a alteração de requisitos regulamentares ou modificação das exigências de serviço.

O uso das fibras de vidro no reforço de estruturas é feito geralmente através da colagem de mantas ou laminados e pode ser aplicado em todos os tipos de estrutura: edifícios, pontes, túneis, tanques, silos, marinas. Estas malhas ou laminados podem ser usadas em vários tipos de reforços: flexão, corte, impacto ou explosão, sísmico ou confinamento, Figura 2.3.



Figura 2.3 – Malha de compósitos de fibra de vidro para reforço de parede [8]

2.3. Aspetos de durabilidade dos GFRP

Existem três elementos em que pode ocorrer o processo de degradação nas armaduras de GFRP: a matriz, as fibras e a ligação fibras/matriz. Cada um destes elementos pode ser suscetível a ataques por agentes externos.

A resina é bastante resistente e é normalmente esta que protege as fibras na interface com o betão, funcionando como uma barreira. Os fatores que podem potenciar a degradação desta barreira são [9]:

- Meio ambiente (pH do betão e existência de elementos iónicos agressivos);
- Tensão aplicada na armadura;
- Temperatura;
- Estado da armadura de GFRP;
- Tipo da armadura, vazios e homogeneidade da resina.

A durabilidade das resinas melhora se estiverem garantidas as propriedades seguintes:

- Impermeabilidade;
- Boa aderência entre as fibras e a matriz.

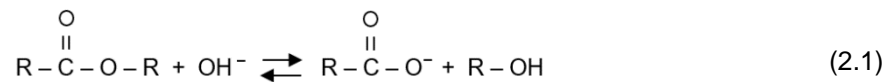
A seguir faz-se uma abordagem sobre o desempenho de GFRP sujeitos a ambientes agressivos e metodologias e análise de resultados experimentais.

2.3.1. Desempenho de GFRP sujeitos a ambientes agressivos

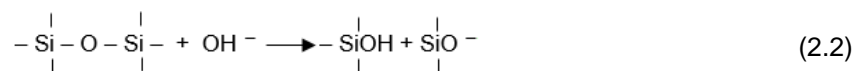
Estudos mostram que o principal agente agressivo para os GFRP são os agentes alcalinos que se podem graduar pelo nível do pH [10,11]. Uma solução para o caso de varões de GFRP reforçando betão seria baixar a alcalinidade do betão incorporando cimento pozolânico, restringindo a degradação das fibras de vidro. Um decréscimo da alcalinidade poderá porém expor o betão à carbonatação, ainda que os GFRP que estão embutidos no betão não despolimerizem com a carbonatação.

A degradação em varões de GFRP começa quando os iões livres de hidróxido (OH^-) e as moléculas de água se difundem através da matriz dos varões de GFRP.

Poliéster, viniléster e epóxi são as resinas mais usadas em varões de GFRP em engenharia civil. No grupo éster, a ligação mais fraca em matrizes de poliéster e viniléster, é propensa à degradação por hidróxidos como mostrado na equação 2.1. A matriz de viniléster, com menos grupos de ésteres, é menos suscetível à hidrólise do que a matriz de poliéster [12,13]. A matriz epóxi não é normalmente afetada pelos hidróxidos, uma vez que não existe nenhum grupo éster na sua estrutura molecular. A deterioração das matrizes também pode ocorrer devido à plasticização e aumento de volume. A equação 2.1 representa ataque de hidróxidos das soluções alcalinas aos poliéster ou viniléster.



Outra reação importante é aquela em que os iões de hidróxido quebram a estrutura de Si-O-Si das fibras de vidro, como mostrado na seguinte equação 2.2.



Como consequência deste ataque químico, pode ocorrer fragilização das fibras.

Devido ao aumento do uso de varões de GFRP em estruturas de betão, a durabilidade dos varões de GFRP tem sido um tema de pesquisa importante nos últimos anos. Os efeitos de vários ambientes, como húmidos, salinos e alcalinos na durabilidade de varões de GFRP foram investigados usando ambientes simulados [11,14,15]. Alguns estudos também investigaram os efeitos de características de materiais como resina e tipos de fibras, tratamento de superfície e processo de fabricação sobre o desempenho de durabilidade de varões de GFRP [12]. Métodos de ensaio acelerado com os fatores de aceleração de temperatura elevada [12] foram frequentemente usados para economizar tempo e custo em estudos de durabilidade. Com base em dados de curto prazo de testes acelerados, o modelo de *Arrhenius* foi adotado por alguns pesquisadores [16] para fazer previsões do comportamento a longo prazo dos varões de GFRP. A lei de difusão de Fick é usada para analisar a difusão de soluções nos GFRP [14,17,18].

A durabilidade dos varões de GFRP tende a ser mais complexa do que a corrosão do reforço de aço, porque a durabilidade dos GFRP está relacionada não só com a resistência dos seus materiais constitutivos (fibras e matriz), mas também com a integridade da interface entre estes dois componentes durante o envelhecimento. Uma deterioração desta interface reduz a transferência das cargas entre as fibras e enfraquece assim o material compósito [15].

Vários estudos têm sido realizados sobre os parâmetros que afetam a durabilidade e comportamento a longo prazo dos GFRP. Esses estudos concluíram que os tipos mais comuns de varões de GFRP tinham problemas de deterioração quando submetidos a ambientes agressivos e que a humidade, alcalinidade e temperatura elevada são os principais parâmetros que afetam a durabilidade dos materiais compósitos. A humidade absorvida pelos compósitos, combinada com a temperatura de exposição, induz tensões no material que danificam as fibras, a matriz e sua interface [16,17]. A temperatura de transição vítrea (T_g) da matriz é também um parâmetro chave, uma vez que marca um ponto para além do qual pode haver alterações significativas das propriedades da matriz e uma redução considerável das propriedades mecânicas pode ocorrer [15].

A composição de soluções alcalinas varia, mas normalmente consiste em NaOH, KOH e Ca(OH)_2 , dissolvidos em água desionizada. O hidróxido de sódio (NaOH) prova ser o álcali mais forte (pH até 14), comparado ao hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), enquanto o hidróxido de potássio (KOH) ronda um pH de 13,9. Amostras deste tipo foram imersas nestes ambientes durante um período de 1 ano [10].

Soluções compostas por 0,02 g/L de Ca(OH)_2 , 0,5 g/L de KOH e 0,15 g/L de NaOH diluído em água destilada com um pH resultante de 12,11, simula condições do betão alcalino, em betão com materiais de substituição de cimento pozolânico antes da iniciação da carbonatação [10].

Outras soluções [11] foram feitas para simular a exposição acelerada de amostras às condições de campo. A solução alcalina pretendia simular condições de um betão normal, com um pH de 13,6. A solução de sulfatos e cloretos de sódio é destinada a simular água do oceano.

Nos ensaios de durabilidade [10,11,19,20] utilizam-se temperaturas elevadas de 40 e 60°C para acelerar o ataque de ambientes simulados em varões de GFRP, uma vez que a taxa de degradação depende principalmente da taxa de difusão e da taxa de reação química, ambas aceleradas por temperaturas elevadas.

Recorre-se a envelhecimento acelerado para avaliar o desempenho de serviço esperado de elementos de betão reforçados com estes varões de GFRP. Vários estudos de pesquisa foram realizados para investigar a durabilidade dos varões de GFRP sob diferentes condições ambientais. *Porter e Barnes* [19] conduziram envelhecimento acelerado para determinar a resistência a longo prazo de três tipos de varões de GFRP expostos a solução alcalina a uma temperatura elevada (60°C) durante períodos de 2-3 meses. Os testes de tração resultaram em perdas de resistência à tração de 29%, 48% e 66% em comparação com a resistência original. *Chu e Karbhari* [21] realizaram um estudo sobre a caracterização e modelação dos efeitos da humidade e soluções alcalinas em laminados compostos por vidro classe E com viniléster a diferentes temperaturas (23°C, 40°C, 60°C e 80°C). O nível de degradação na resistência à tração variou entre 35% e 62% dos valores iniciais.

Al-Zahrani [22] investigou a degradação da resistência residual à tração de três tipos de varões de GFRP em soluções agressivas. Varões foram condicionados em soluções alcalinas com três temperaturas diferentes por 3 a 12 meses. A redução máxima da resistência à tração variou entre 27% e 71% a 60°C. *Kim, Park, You et al.* [23] realizaram um ensaio de durabilidade de curto prazo em dois tipos de GFRP comercialmente disponíveis, vidro de classe E com viniléster, sob quatro condições ambientais diferentes (humidade, cloreto, alcalinas e congelamento-descongelamento) até 132 dias. Além dos 25°C, temperaturas elevadas de 40 e 80°C foram utilizadas para acelerar a degradação dos varões de GFRP. Concluíram que a alcalinidade alta teve maior influência sobre a degradação da resistência à tração dos varões de GFRP.

Um estudo recente sobre a durabilidade dos varões de GFRP em betão húmido foi realizado por *Robert, Cousin e Benmokrane* [20]. Varões de GFRP revestidos com areia e com diâmetro de 12,7 mm foram incorporados em betão e expostos a água da torneira a 23, 40 e 50°C durante períodos de 60-240 dias. Os resultados dos ensaios de tração mostraram que a 40 e 50°C, a diminuição da resistência à tração foi de 10% e 16%, respetivamente, em relação à resistência à tração original, após 240 dias de exposição.

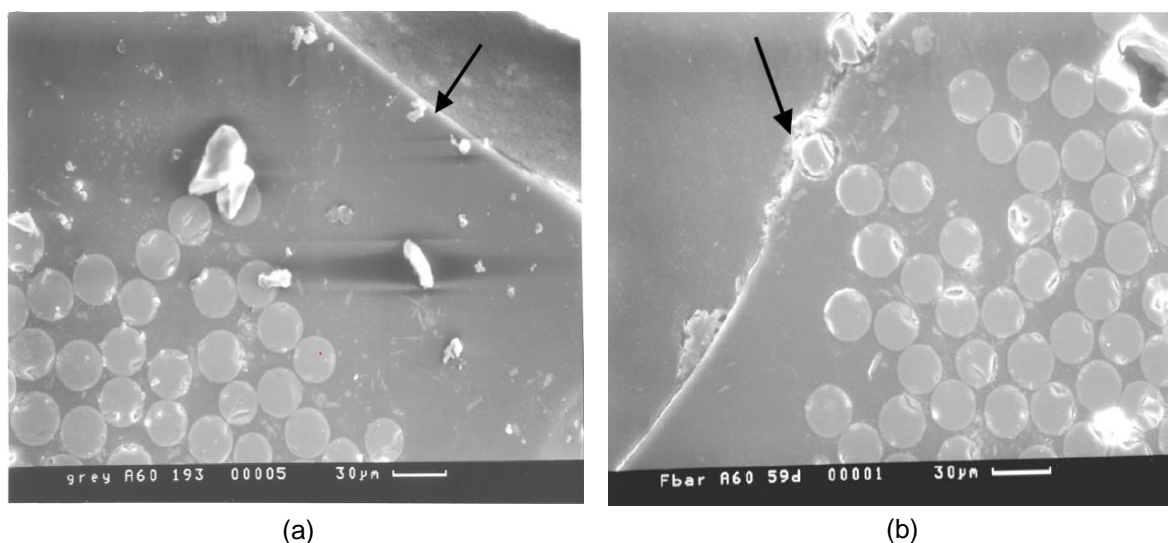
Estudos de difusão mostram que varões de GFRP de diâmetro 10 mm impregnados com resina viniléster imersos em água ionizada a 20°C possuem ganhos de massa no valor de 1,5%, para um período de exposição de 2500 horas, revelando um comportamento Fickiano [24]. A evolução de massa dos varões de GFRP no ambiente de água ionizada e alcalino é semelhante devido ao ataque das moléculas de água, por parte da água ionizada, e ataque de iões de hidróxido, por parte do ambiente alcalino, que proporcionam a degradação da matriz.

Foram também conduzidos estudos de ganho de massa de varões de 10 mm em ambientes alcalinos a 20°C e a 60°C [24]. Verificou-se um aumento de massa dos varões no ambiente alcalino a 20°C de 2,0% às 2500 horas. A temperatura de 60°C, o varão de GFRP teve ganhos de massa muito superiores para um menor período de exposição, com deterioração total de matriz do varão, de onde se concluiu que se trata de uma temperatura demasiado elevada para acelerar o envelhecimento dos varões de GFRP.

No estudo realizado por *Dejke* [24] sobre concentração de elementos químicos provenientes do ambiente alcalino presentes nos varões de GFRP, são utilizadas proporções de NaOH, KOH e CaOH semelhantes às do presente trabalho. Constata-se nesse estudo pouca concentração de iões álcalis na periferia da secção transversal ao fim de 4600 horas de exposição a uma temperatura de 60°C [24]. Análises mostram que iões alcalinos podem penetrar os varões de GFRP, embora a resina atue geralmente como uma membrana semipermeável permitindo a passagem de moléculas de água mas não de iões álcalis [25].

Dejke [24] exhibe imagens SEM da secção transversal de varões de GFRP, classe E-glass, de diferentes fabricantes expostos ao ambiente alcalino a 60°C durante 4600 horas. Pode-se verificar algum dano na superfície dos varões de GFRP, nomeadamente na resina, Figura 2.4 (a). As fibras de vidro aparentam estar intactas. Na Figura 2.4 (b), para além da resina, já é visível alguma degradação da fibra de vidro. As setas indicam a região da periferia danificada. Observa-se que a temperatura, ao

aumentar, é causadora de maior velocidade de degradação do material justificando que no presente trabalho não se observassem algumas destas alterações.



(a) Fabricante *Hughes Brothers*; (b) Fabricante *FIBERBAR*

Figura 2.4 – Secção transversal exposta ao ambiente alcalino a 60°C durante 4600 horas [24]

Um estudo conduzido por *Dai e He* [26] mostra resultados de temperatura de transição vítrea, T_g , obtidos para varões de GFRP embutidos em provetes de betão com fissuras, submetidos ao ambiente alcalino a 50 °C durante 18 meses. A média dos valores obtidos para varões de referência, é de 125 °C e para varões de GFRP sujeitos ao ambiente alcalino, de 122 °C, traduzindo-se deste modo, numa diminuição de 2,45%. A análise não detetou grande impacto nas propriedades térmicas da resina, como resultado do condicionamento.

Em relação a estudos sobre degradação do betão, tem sido demonstrado que o recobrimento de betão altera a porosidade devido à contaminação de sulfatos e cloretos [27]. A partir da distribuição de tamanho de poros (DTP) do betão contaminado, é possível detetar uma redução no volume de poros com diâmetro menor que 0,025 µm ao passo que o volume de poros entre os diâmetros 0,025 e 0,2 µm aumenta. Observa-se também diminuição de porosidade do betão após contaminação. A razão provável é que os sais cristalizados e as reações entre os contaminantes e o betão permaneceram na estrutura porosa. Outra razão é o aparecimento de microfissuras devido a sais de cristalização. Ambos contribuíram para mudanças na microestrutura do betão que afetaram os fenómeno de transporte de massa [27].

2.3.2. Metodologias e análise de resultados experimentais

Nos ensaios de arrancamento e tração, recorre-se à proteção das extremidades dos varões de GFRP com tubos metálicos e injeção de cimento expansivo ou resina epóxi nos vazios entre o varão e o tubo metálico, interligando os materiais. Esta envolvente permite que não haja enfraquecimento nem rutura nestas zonas, pretendendo-se desta maneira levar os varões de GFRP à rutura a meio do varão. Por outro lado, existe grande probabilidade de ocorrer deslizamento entre a interface varão/resina [10].

Chen, Davalos, Ray et al. [11] testaram amostras incondicionadas e condicionadas para resistência à tração para avaliar o desempenho de durabilidade dos varões de GFRP. As amostras de GFRP destes ensaios de tração possuem um diâmetro de 10 mm e comprimento de 1,02 m. O sistema de aperto utilizado é constituído por um tubo de aço de 200 mm de comprimento cortado longitudinalmente em duas metades. Revestidos com epóxi na superfície interna, os meios tubos partidos foram ligados nas extremidades de cada uma das barras FRP com braçadeiras.

Após período de contaminação das amostras, pequenas bolhas brancas foram observadas na superfície externa dos varões de GFRP, especialmente nas amostras expostas a soluções a 60°C [11]. Similar "branqueamento" também foi observado anteriormente por Bank, Puterman e Katz [28]. Os resultados dos ensaios de resistência à tração de amostras não condicionadas e condicionadas estão resumidos no Quadro 2.1. Durante o teste de tração, os varões de GFRP mostraram um comportamento elástico até à falha e falharam através da rotura de fibras. A falha dos varões de GFRP foi acompanhada de separação das fibras e da rutura do feixe de fibras com padrão espiral na superfície deformada dos varões, Figura 2.5. No ambiente alcalino a 60°C, observou-se uma degradação significativa, Quadro 2.1. Foram utilizadas 6 amostras para cada condição. Modos semelhantes de rotura de tração dos varões de GFRP também foram observados por Micelli e Nanni [15].

Quadro 2.1 – Resultados dos ensaios de tração dos varões de GFRP [11]

Varão	Ambiente de exposição	Temperatura (°C)	Dias de exposição	Média da tensão à tração (MPa)	Perda de resistência à tração (%)
GFRP	Referência	-	-	771	-
	Alcalino	60	70	493	36
		40		688	11
	Salino	60		572	26
		40		754	2

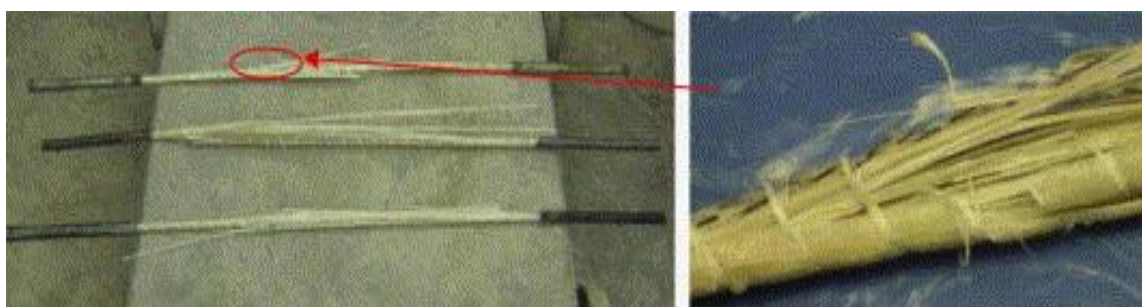
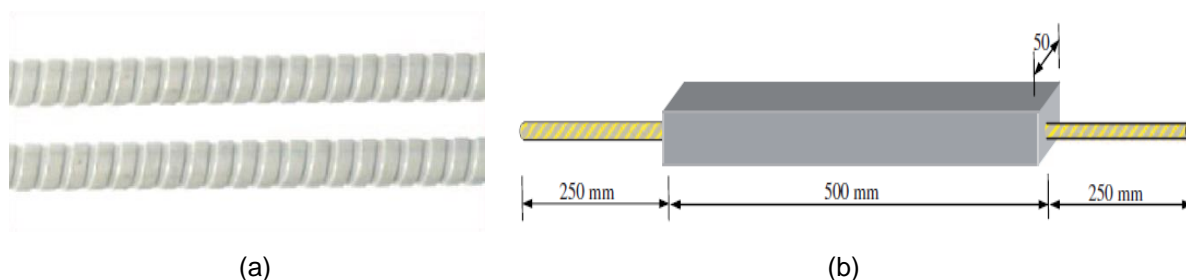


Figura 2.5 – Modo de rotura típico nos varões de GFRP [11]

Almusallam, Al-Salloum, Alsayed et.al, recorrendo a um programa experimental [29], investigam as propriedades mecânicas de quatro tipos de varões de GFRP disponíveis no mercado para seleccionar o melhor tipo utilizado, bem como a sua durabilidade. Dez amostras de varão de GFRP de cada tipo foram utilizadas nos ensaios de tração. Os testes de tração foram de acordo com a norma ASTM D 7205 [30]. Os varões de GFRP seleccionados possuíam 12 mm de diâmetro externo e um perfil de superfície especial de nervuras regulares, Figura 2.6 (a). Os varões eram compostos por fibras impregnadas numa resina viniléster termoendurecível com um teor de fibra de 83%. Para estar mais

próximo das condições de campo real onde os varões estão embutidos no betão, os varões de GFRP utilizados em [29] foram incorporados em prismas de betão antes do envelhecimento em diferentes condições ambientais, Figura 2.6 (b).



(a) Geometria da superfície GFRP; (b) Representação esquemática de varões de GFRP embutidos em betão.

Figura 2.6 – Varões de GFRP [29]

As amostras foram sujeitas a nove condições ambientais para 6, 12 e 18 Meses. Os ambientes incluíam a exposição à água da torneira e água do mar a duas temperaturas (20 e 50°C). Preparou-se uma solução alcalina usando hidróxido de cálcio, hidróxido de potássio e hidróxido de sódio (1,185 g de Ca(OH)_2 + 9,0 g de NaOH e 42,0 g de KOH por 10 litros de água). Os efeitos de cada condição ambiental sobre a resistência à tração dos varões foram determinados comparando os resultados com os das amostras de referência.

Todos os varões foram ensaiados de acordo com a norma ASTM D 7205 [30] e o código ACI 440.3R-04 B2 [31]. O comprimento total do varão foi de 1,0 m. Após a extração do varão, do prisma de betão, tubos de 300 mm de comprimento para proteção das extremidades foram feitos. Assim, o comprimento de ensaio livre da amostra foi de 400 mm, Figura 2.7.



Figura 2.7 – Modo de rotura do varão de GFRP [29]

A velocidade de carregamento variou entre 250 e 300 MPa / min. A carga aplicada e o alongamento do varão foram registados durante o ensaio utilizando um sistema de aquisição de dados monitorizado por um computador.

Para as amostras em solução alcalina a 50°C, uma redução significativa na resistência à tração foi registada, Quadro 2.2, que é principalmente devido ao dano da resina, como pode ser observado na análise microscópica, Figura 2.8. Foram ensaiadas 5 amostras para cada situação. Após 6, 12, e 18 meses de exposição, a queda foi de 12,1%, 17,8% e 21,7%, respetivamente.

Quadro 2.2 – Resultados da resistência à tração dos varões de GFRP [29]

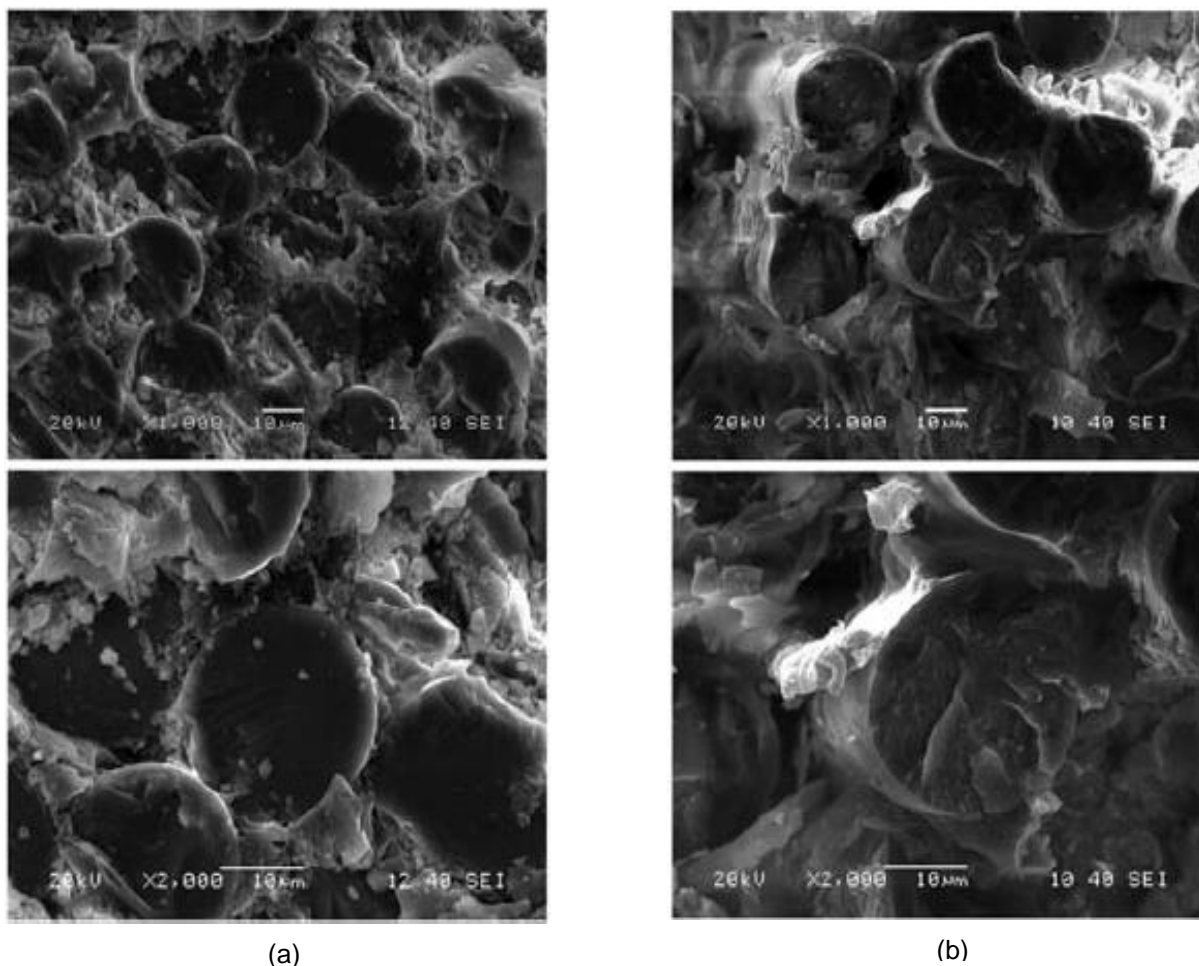
Ambiente de exposição	Temperatura (°C)	Meses de exposição	Valor médio da tensão à tração (MPa)	Degradação mecânica (%)
Referência	-	-	1474	-
Água ionizada	20	6	1397	5
		12	1388	6
		18	1379	6
	50	6	1229	17
		12	1158	21
		18	1123	24
Salino	20	6	1393	5
		12	1349	8
		18	1267	14
	50	6	1269	14
		12	1300	12
		18	1238	16
Alcalino	50	6	1296	12
		12	1211	18
		18	1149	22

As condições ambientais não influenciam significativamente o módulo de elasticidade dos varões de GFRP. Para todos os ambientes, existe uma perda entre 0% e 10% [29]. Isto pode ser devido ao fato de o módulo de elasticidade ser obtido através de baixos valores de tensão, e nesta gama de tensões, as fibras estavam intactas na resina, que apenas degradou ligeiramente sob a exposição de alguns dos ambientes. A degradação baixa de resina teve efeito significativo sobre a resistência à tração dos varões de GFRP por causa da delaminação ocorrida durante a fase de carregamento relativamente precoce. Estes resultados estão de acordo com conclusões relatadas por diferentes autores [20,22]. Além disso, *Correia, Cabral-Fonseca, Branco* et al. [32] concluíram que esse comportamento é devido ao fato de o módulo de elasticidade de GFRP ser afetado somente pela temperatura de transição vítrea, que é acima de 50°C.

Foi feita também uma análise microestrutural dos varões de GFRP. O microscópio eletrónico de varrimento (MEV, SEM em inglês) foi utilizado para investigar os fenómenos de degradação ocorridos durante o envelhecimento. A superfície exterior e as secções transversais dos varões de GFRP em ambientes alcalinos após 18 meses de exposição foram examinadas e comparadas com as amostras de referência. Resultados dos testes de tração e as curvas tensão-deformação para amostras não

condicionadas e condicionadas foram quase lineares até a falha. Todas as amostras apresentaram rotura de fibras no comprimento [29].

A Figura 2.8 mostra imagens SEM das secções transversais dos varões de referência e submetidos ao ambiente alcalino. Pode-se observar que a resina em torno das fibras de vidro nas amostras submetidas ao ambiente alcalino foi deteriorada. Muitos vazios foram observados entre as fibras e as interfaces fibra-resina, que afetou a ligação entre as fibras de vidro e a resina. Consequentemente afetaram as propriedades dos varões de GFRP na rotura. O dano à resina conduz à distribuição não uniforme da carga entre fibras, que assim falham progressivamente, levando a uma baixa resistência à tração. Em níveis de carga mais baixos, as fibras de vidro nas zonas deterioradas suportaram a carga aplicada, resultando em baixas reduções no valor do módulo de elasticidade dos varões de GFRP como foi possível observar a partir dos resultados dos ensaios de tração (reduções apenas 0% a 10% no módulo de elasticidade). No entanto, em maiores níveis de carga perto da falha, essas fibras foram o ponto fraco nos varões de GFRP.



(a) Varão de referência; (b) Varão exposto a ambiente alcalino.

Figura 2.8 – Imagens SEM das secções transversais dos varões de GFRP [29]

No Quadro 2.3 apresenta-se um resumo dos resultados de degradação mecânica dos varões de GFRP obtidos pelos autores referidos neste trabalho.

Quadro 2.3 – Resultados obtidos nos ensaios de tração dos varões de GFRP por vários autores após envelhecimento em ambiente alcalino

Autores	Referência bibliográfica	Ø (mm)	Temperatura (°C)	Período de exposição (horas)	Degradação mecânica (%)
<i>Chen, Davalos, Ray et al.</i>	[11]	10	60	1700	36
<i>Robert, Cousin e Benmokrane</i>	[20]	12,7	50	5700	16
<i>Dejke</i>	[24]	10	60	4800	55
<i>Almusallam, Al-Salloum, Alsayed et al.</i>	[29]	12	50	4300	12

A partir dos resultados dos ensaios apresentados pelos vários autores pode-se concluir:

- A alcalinidade do ambiente do betão normal simulado foi a condição mais agressiva para varões de GFRP;
- A temperatura elevada acelerou a degradação das amostras;
- Para exposição a um ambiente alcalino entre 50 e 60°C, existe diminuição da resistência à tração dos varões de GFRP, com perdas entre 12 a 55%, entre as 4300 a 5700 horas de exposição, Quadro 2.3;
- Para amostras ensaiadas, o módulo de elasticidade não foi significativamente alterado após 18 meses em diferentes tipos de exposição;
- A perda na resistência à tração dos varões de GFRP é devido à deterioração significativa em ambientes alcalinos a 50°C, que se observa nas imagens SEM, da matriz em redor das fibras de vidro;
- Fibras resistentes à alcalinidade com tamanho adequado, podem ser úteis para melhorar ainda mais o desempenho de durabilidade dos varões de GFRP em ambientes alcalinos.

Capítulo 3

Trabalho experimental

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo é apresentado o trabalho experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação, com vista à caracterização dos varões de GFRP e dos recobrimentos de calda e de betão. É feita uma abordagem sobre: a descrição dos materiais utilizados, preparação das amostras e ambientes de exposição/trabalho, ensaios e apresentação de resultados.

3.2. Descrição dos materiais

Nesta secção é feita a caracterização dos materiais utilizados no trabalho, nomeadamente os varões de GFRP, a calda (*REABILITA Cal Inject*), o betão e a resina utilizada nos ensaios de tração dos varões de GFRP.

3.2.1. Varões de GFRP

Os varões de GFRP adquiridos à *Fyfe Co. LLC* são varões pré-fabricados, têm uma secção circular e provêm de fibras de vidro de alta resistência alinhadas numa direção e embebidas com resina viniléster. Os diâmetros disponíveis para este caso de estudo são de 10, 16 e 25 mm.

A geometria da superfície dos varões é um enrolamento em espiral, o que permite aumentar a capacidade de aderência nestes materiais compósitos, Figura 3.1.



Figura 3.1 – Geometria da superfície do varão de GFRP (enrolamento em espiral)

No Anexo A estão apresentadas as características mecânicas dos varões de GFRP utilizados neste caso de estudo.

3.2.2. Calda *REABILITA Cal Inject*

O *REABILITA Cal Inject* é uma argamassa pré-doseada seca formulada com cal hidráulica natural, destinada ao reforço de alvenarias antigas com o recurso à técnica de injeção, Figura 3.2., dispondo de elevada trabalhabilidade e fluidez. Para este trabalho experimental, recorreu-se a esta argamassa para estudar o seu desempenho como recobrimento nos varões de GFRP. A composição à base de cal hidráulica natural assegura compatibilidade química e mecânica com as alvenarias antigas. As propriedades hidráulicas garantem o desenvolvimento moderado da resistência mecânica ao longo do tempo. A não presença de sais solúveis no *REABILITA Cal Inject* minimiza a ocorrência de fenómenos de degradação associados à formação de eflorescências (Anexo B – Ficha Técnica do *REABILITA Cal Inject*).



Figura 3.2 – *REABILITA Cal Inject*

O *Reabilita Cal Inject* foi amassado por 5 minutos num misturador de alta rotação com cerca de 5,5 a 6,0 litros de água por cada saco de 20 kg, até à obtenção da consistência correta.

3.2.3. Betão

O betão utilizado tem funções de recobrimento de varões de GFRP. Foi preparado no DEC FCT UNL, em laboratório, no âmbito de um trabalho realizado pelo Eng.º Nuno Dinarte Gouveia, aluno de doutoramento, tendo feito uma comunicação pessoal sobre as características do betão. A sua composição é apresentada no Quadro 3.1. É constituído por areia fina e grossa, brita fina e grossa e adjuvante da Sika ViscoCrete 3008. Apresenta-se a curva granulométrica de cada agregado na Figura 3.3. Ensaaiaram-se seis cubos e seis cilindros de betão, obtendo-se os valores médios de resistência aos 60 dias de idade, Quadro 3.2. Estes provetes foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial para determinação da resistência à compressão, de acordo com a norma portuguesa NP EN 12390-3 de 2011 [33].

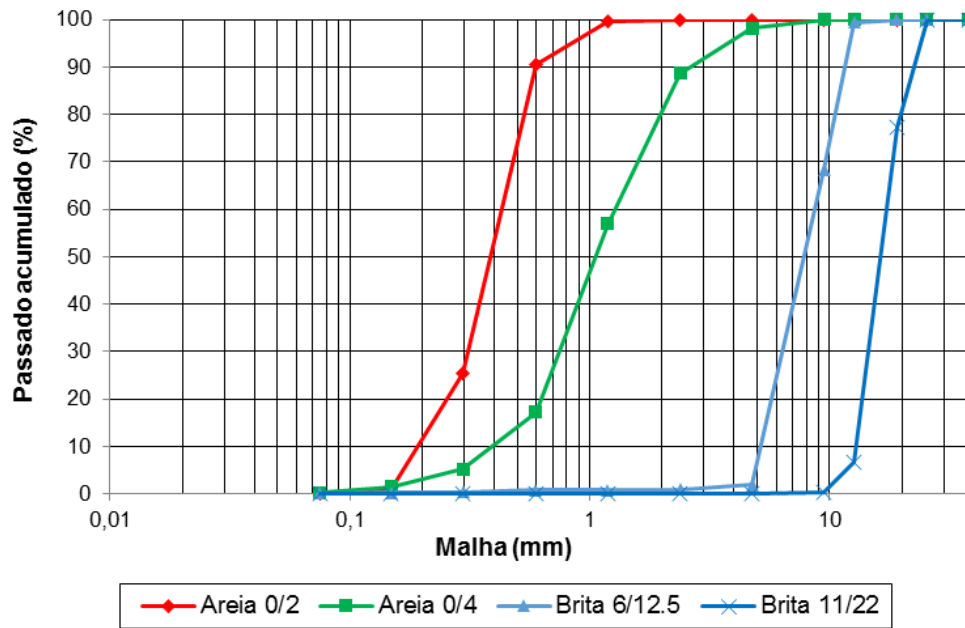


Figura 3.3 – Curvas granulométricas dos agregados constituintes do betão

Quadro 3.1 – Composição do betão

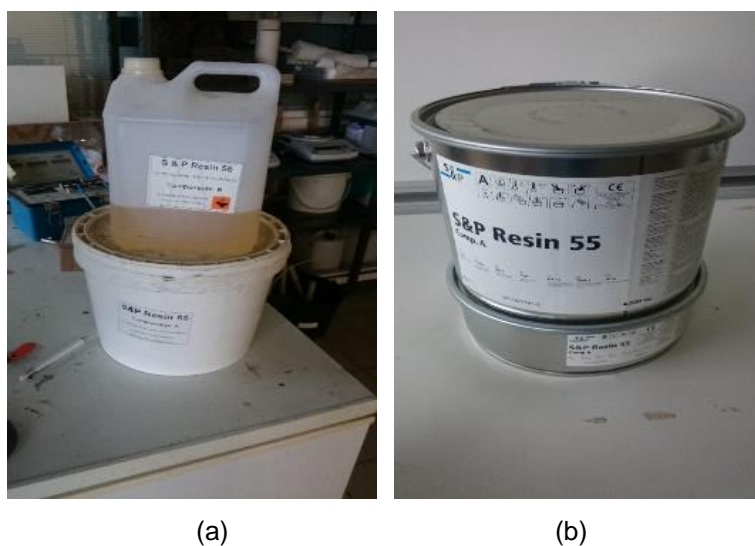
Componentes	Quantidade
CEMII	430 kg/m ³
Areia 0/2	375 kg/m ³
Areia 0/4	445 kg/m ³
Brita 6/12,5	455 kg/m ³
Brita 11/22	440 kg/m ³
Água	158 l
Adjuvante Sika ViscoCrete 3008	5,2 l

Quadro 3.2 – Características mecânicas do betão aos 60 dias

σ_{cubos} (MPa)	$\sigma_{\text{cilindros}}$ (MPa)	$E_{\text{c,betão}}$ (GPa)
66,5	63,6	45,6

3.2.4. Resina

A resina foi utilizada na interligação entre os varões de GFRP e os tubos de aço utilizados nos ensaios de tração. A resina é designada por *S&P Resin 55*, Figura 3.4, e é composta por dois componentes, conforme representado na ficha técnica, Anexo C. No trabalho experimental, foram utilizadas resinas fornecidas pelo laboratório do DEC e S&P Clever Reinforcement Iberica Lda.



(a) Fornecida pelo laboratório do DEC; (b) Fornecida por S&P Clever Reinforcement Iberica Lda

Figura 3.4 – Resina S&P Resin 55

3.3. Preparação das amostras e ambientes de exposição/trabalho

Na presente secção é abordada a preparação dos materiais, a saber: varões de GFRP, provetes cilíndricos de calda e de betão. Nesta secção, é também abordada a preparação dos ambientes de exposição/trabalho, onde irão ser colocadas as amostras.

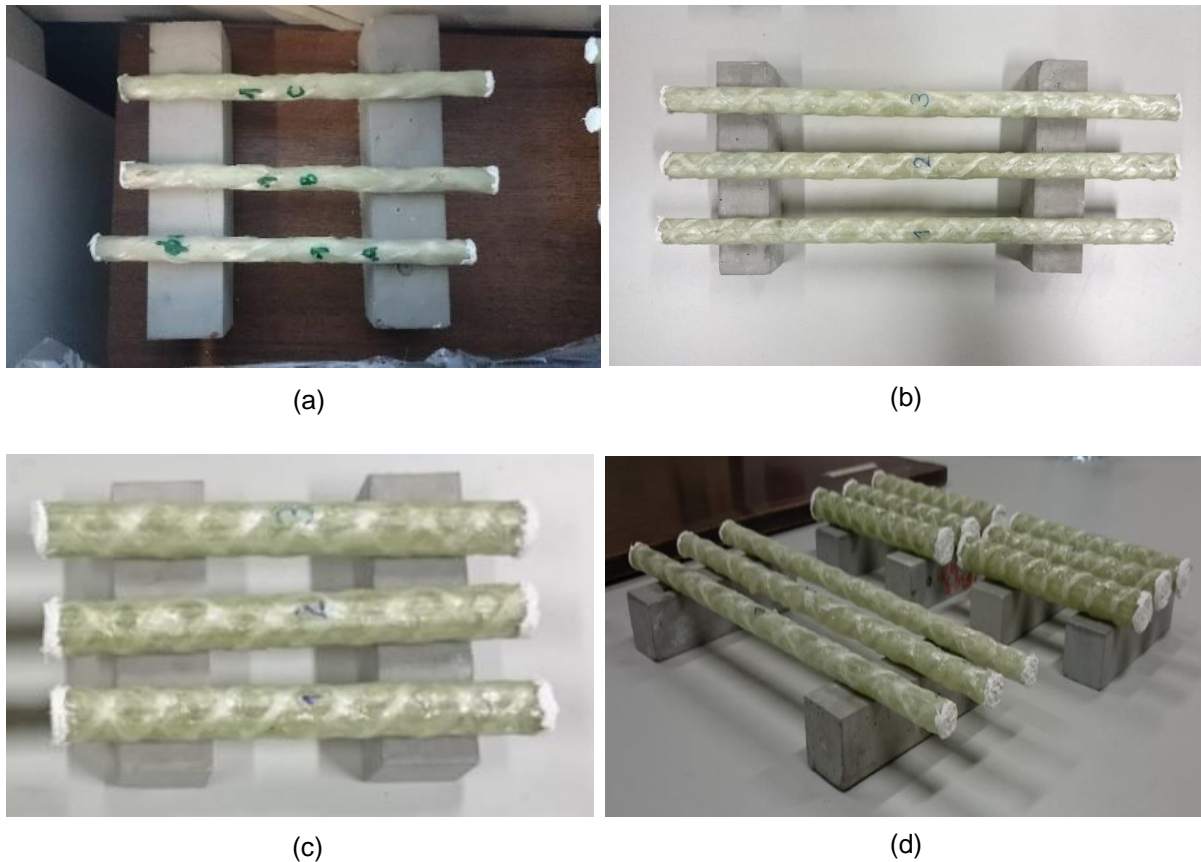
3.3.1. Varões de GFRP

Através de imersão nas soluções feitas em laboratório, pretende-se estudar a difusão molecular. A simulação desses ambientes é feita a partir de soluções aquosas [11]. Neste caso de estudo, estudou-se a difusão em varões de GFRP. A direção do fluxo das soluções incidiu transversalmente nos varões de GFRP. Para o efeito, vedaram-se os topos de secção circular dos varões com silicone, impedindo a penetração longitudinal, Figura 3.5.



Figura 3.5 – Vedação dos topos dos varões de GFRP com silicone

Os varões preparados sujeitos a contaminação de ambientes de exposição foram: 3 varões de Ø16 mm com 40 cm de comprimento, 6 varões de Ø25 mm com comprimento de 20 cm e 9 varões de Ø10 mm com comprimentos de 20 cm, Figura 3.6.



(a) Varões de Ø10 mm; (b) Varões de Ø16 mm; (c) Varões de Ø25 mm; (d) Conjunto

Figura 3.6 – Varões de GFRP a submergir nos ambientes de exposição

3.3.2. Provetes cilíndricos de calda com varões de GFRP embutidos

Um dos fatores importantes a ter em conta nos ensaios de contaminação dos varões é o recobrimento. Em situações de campo, os varões estão protegidos com uma espessura de recobrimento, podendo ser argamassa ou betão. Numa situação onde se faz reforço de paredes, podem ser utilizadas argamassas como *REABILITA Cal Inject*.

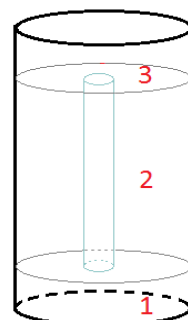
Foram moldados 8 provetes cilíndricos de calda com 80 mm de diâmetro e 255 mm de altura, com varão de GFRP embutido. Realizou-se, deste modo, um plano de produção destes provetes, que está dividido em três fases de enchimento.

Previamente procedeu-se à montagem do molde, através de um tubo de pvc com diâmetro interior de 80 mm. Realizou-se um corte longitudinal no tubo de pvc, de maneira a obter duas metades tendo em vista facilitar a desmoldagem do provete. De seguida procedeu-se à junção das duas metades com fita

adesiva e aplicação de silicone nas juntas. Aplicou-se lubrificante nas paredes interiores do molde que foi fixado sobre uma base acrílica, com silicone como demonstrado na Figura 3.7 (a).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

(a) Preparação dos moldes cilíndricos pvc; (b) Esquema de enchimento de calda por fases; (c) Enchimento da camada 1; (d) Enchimento da camada 2; (e) Enchimento da camada 3; (f) Provetes cilíndricos de calda.

Figura 3.7 – Procedimentos de preparação do provete de calda

O objetivo é obter recobrimento em todas as faces do varão. O varão com diâmetro de 25 mm encontra-se no centro do molde, alinhado com o eixo de revolução do molde cilíndrico, afastado 2,75 cm das paredes do molde, 2,75 cm acima da base e 2,75 cm abaixo do topo do provete. Realizou-se o enchimento do provete de calda em 3 fases, Figura 3.7 (b). Preparações da calda encontram-se nas especificações recomendadas na ficha técnica do material, Anexo B.

A primeira fase de enchimento começa com a camada 1, Figura 3.7 (c). Após secagem da camada 1 o varão é colocado e fica em contacto com a superfície da camada. A segunda fase inicia-se com o enchimento da camada 2, Figura 3.7 (d). O varão é ajustado ao centro à medida que a calda é vertida e adquire presa. A terceira fase dá-se com o enchimento da camada 3, Figura 3.7 (e). Aguardou-se uma semana para descofrar os moldes do provete, Figura 3.7 (f). Na preparação do provete criaram-se superfícies rugosas entre camadas, para garantir uma melhor aderência. Fez-se medição das condições de preparação da calda, estando os valores apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Condições de preparação da calda

Condições	1ª Fase	2ª Fase	3ª Fase
Temperatura	24 °C	18 °C	20 °C
HR	65%	60%	65%

3.3.3. Provetes cilíndricos de betão com varões de GFRP

Para simular situações de campo onde os varões de GFRP fazem parte de reforço estrutural, conceberam-se 9 provetes cilíndricos de betão com varões de GFRP, Figura 3.8. Este é um processo simples de conceção que consiste em realizar betonagem em moldes cilíndricos e colocar o varão de GFRP com diâmetro igual a 25 mm no molde. Foi aplicada resina na base do provete final de betão para impedir que houvesse penetração direta dos reagentes químicos no varão de GFRP.



Figura 3.8 – Provete de betão com varões de GFRP

3.3.4. Ambientes de exposição/trabalho

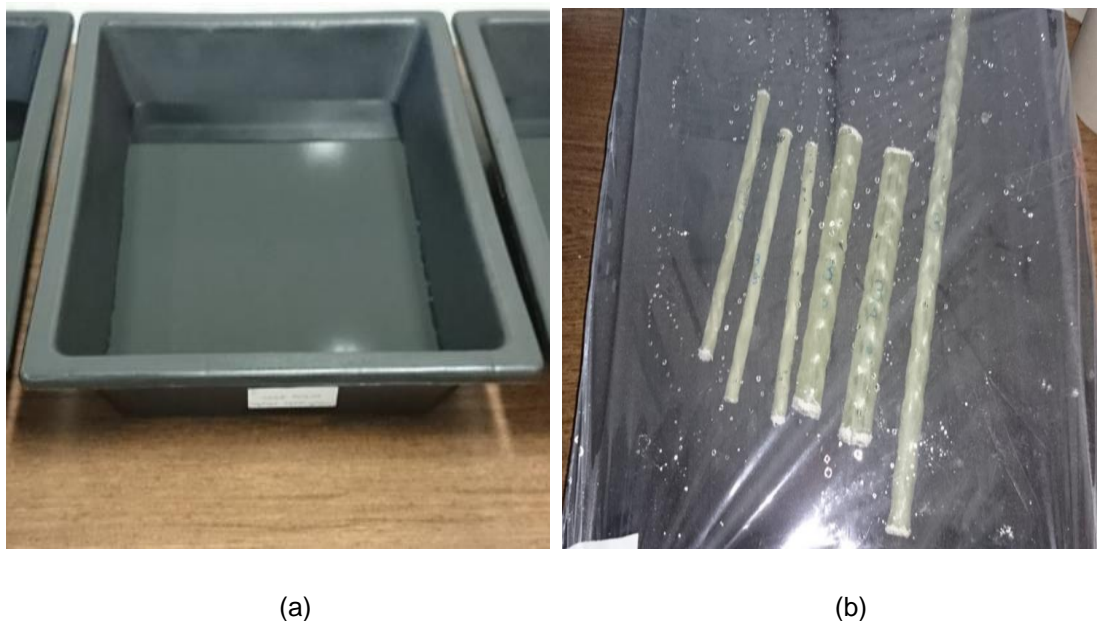
Simularam-se ambientes de exposição para os varões de GFRP submersos a longo prazo, para se perceber o comportamento das propriedades dos varões de GFRP, comparando a degradação física, química, e mecânica dos varões contaminados, com os de referência.

Baseado nas soluções preparadas por *Chen, Davalos, Ray et. al* [11], prepararam-se três soluções distintas. As soluções representam ambientes agressivos, tais como: o salino (Solução 1); o ambiente alcalino presente no betão (Solução 2) cujas armaduras estão em contacto permanente; e ataques de sulfatos e cloretos de sódio (Solução 3). A composição destas condições ambientais é apresentada no Quadro 3.4, enunciando os reagentes e respetivas quantidades.

Quadro 3.4 – Composição das soluções

Solução 1 (Salina)	Solução 2 (Alcalina)	Solução 3 (Sulfatos e Cloretos)
50 g/l sal	2,4 g/l NaOH + 19,6 g/l KOH + 2 g/l Ca(OH) ₂	30 g/l NaCl + 5 g/l Na ₂ SO ₄

Prepararam-se as 3 soluções em recipientes diferentes, colocando em cada um deles, os varões de GFRP previamente preparados, Figura 3.9, apresentadas no Quadro 3.5.



(a) Soluções; (b) Imersão dos varões de GFRP.

Figura 3.9 – Colocação dos varões de GFRP nas soluções que representam ambientes agressivos

Prepararam-se soluções respeitando as dosagens dos reagentes por litro, e colocaram-se os provetes de calda de modo a ficarem totalmente submersos nas soluções, Figura 3.10 (a). A secagem dos provetes de calda antes de imersão foi de 75 dias.

Os provetes cilíndricos de betão não ficam submersos na totalidade nas soluções, pois neste caso de estudo pretendeu-se uma penetração das soluções na direção transversal. Uma vez que o varão de fibra de vidro estava sobressaído na face de topo, ao verter as soluções para os recipientes, o nível da solução ficou aproximadamente a dois terços da altura do provete, de modo a que a solução não fique em contacto direto com o varão, Figura 3.10 (b).



(a) Provetes de calca; (b) Provetes de betão.

Figura 3.10 – Imersão dos provetes de calca e betão com varão de GFRP nas 3 soluções do caso de estudo

No Quadro 3.5 apresentam-se as quantidades de provetes colocadas nas soluções.

Quadro 3.5 – Número de varões de GFRP, provetes de calca e de betão com varão de GFRP em cada solução

Amostra		Solução 1	Solução 2	Solução 3
Varão GFRP	Ø = 10 mm; L = 200 mm	3		
	Ø = 16 mm; L = 400 mm	1		
	Ø = 25 mm; L = 200 mm	2		
Provetes de calda		3	3	2
Provetes de betão				3

3.4. Realização e apresentação de resultados de ensaios

Nesta secção é feita a caracterização física da calca e do betão, bem como a caracterização física e mecânica dos varões de GFRP. São também apresentados os resultados obtidos nos ensaios.

3.4.1. Caracterização física dos varões de GFRP, betão e calca

Para se alcançar os objetivos inicialmente propostos, foram realizados os seguintes trabalho/ensaios:

- Difusão molecular das soluções nas amostras;
- Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX);
- Determinação de massa volúmica aparente e porosidade aberta;
- Porosimetria de mercúrio;
- Microscópio eletrónico de varrimento (SEM);
- Calcinação.

3.4.1.1 Difusão molecular das soluções nas amostras

A difusão molecular é o fenómeno de transporte de matéria onde um soluto é transportado devido aos movimentos das moléculas de um fluido (líquido ou gás), das zonas de mais elevada concentração para zonas de baixa concentração, na tentativa de igualar as concentrações [34]. A taxa deste movimento é função da temperatura, viscosidade do fluido e tamanho (massa) das partículas, mas não depende da concentração. A difusão explica o fluxo líquido (o balanço) de moléculas de uma região de concentração mais alta para uma de concentração mais baixa. O resultado da difusão é uma gradual mistura de materiais. A difusão molecular é tipicamente descrita matematicamente usando-se as leis de Fick da difusão.

A sorção de humidade pelos varões de GFRP pode causar dano e é importante avaliar, tanto a proteção que a argamassa envolvente fornece aos varões embutidos, como os efeitos do contato direto dos reagentes químicos com os varões, para análise do comportamento estrutural destes materiais.

Quanto maior a difusividade (de uma substância em relação à outra), mais rápido se difundem as substâncias [34].

O ganho de massa de um corpo de prova cilíndrico em função do tempo pode ser expresso matematicamente a partir das equações (3.1) e (3.2) [24,35]. As equações são adequadas para tempos curtos e longos, respetivamente. As equações aplicam-se a um cilindro com apenas difusão radial:

$$M(t) = M_{sat} \left[4\sqrt{\frac{\alpha t}{\pi R^2}} - \frac{\alpha t}{R^2} \right] \quad \text{para } \alpha t / R^2 < 0.02 \quad (3.1)$$

$$M(t) = M_{sat} \left[1 - \sum_{m=1}^6 \frac{4}{\alpha_{m0}^2} \right] e^{-\frac{\alpha_{m0}^2 \alpha t}{R^2}} \quad \text{para } \alpha t / R^2 \geq 0.02 \quad (3.2)$$

onde:

$M(t)$	ganho de massa em função de t
M_{sat}	ganho de massa máximo
α	coeficiente de difusão
t	tempo (a duração do ganho de massa)
R	raio do cilindro
α_{m0}	raízes para $J_0(\alpha_{m0}) = 0$
J_0	funções de Bessel do primeiro e segundo tipo e ordem zero

O coeficiente de difusão α , muitas vezes designado por D , pode ser calculado após o ajuste da curva dos dados experimentais e, para o segmento inicial linear de $M(t)$ versus \sqrt{t} , estão disponíveis várias expressões [24,36], por exemplo:

$$\alpha = \frac{\pi R^2}{16} \left(\frac{M_2 - M_1}{M_m} \right)^2 \left(\frac{1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (3.3)$$

onde:

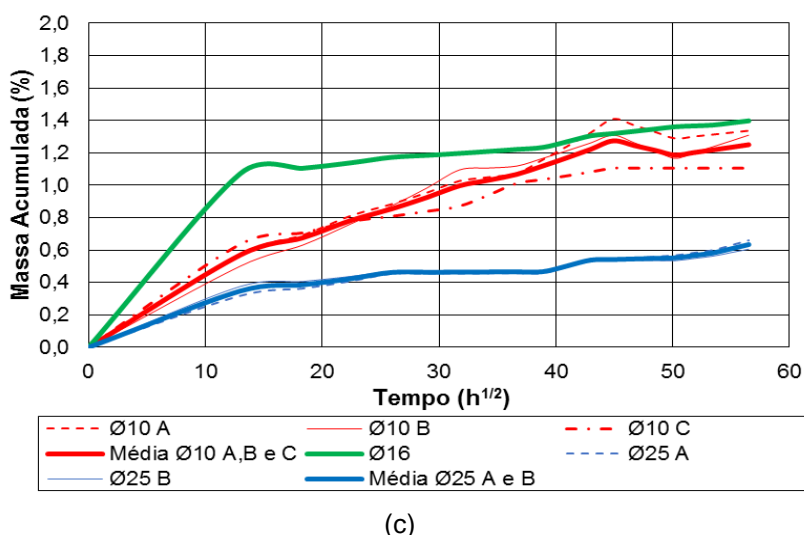
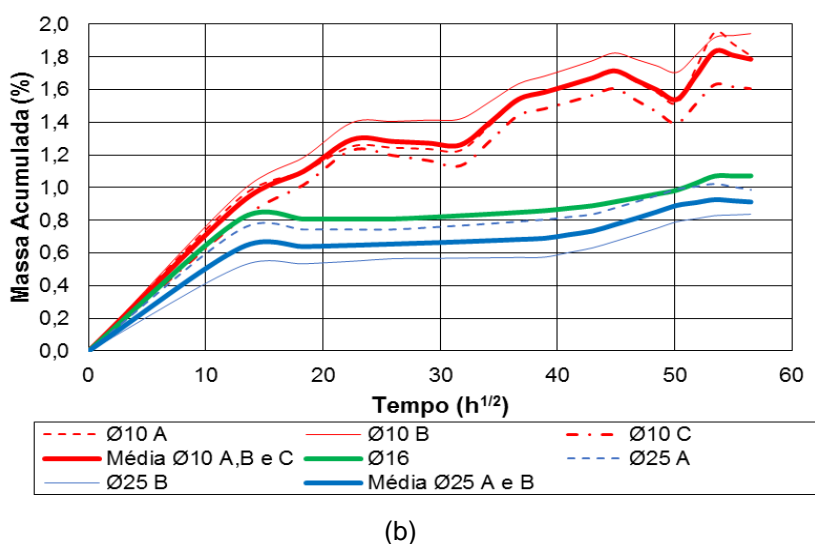
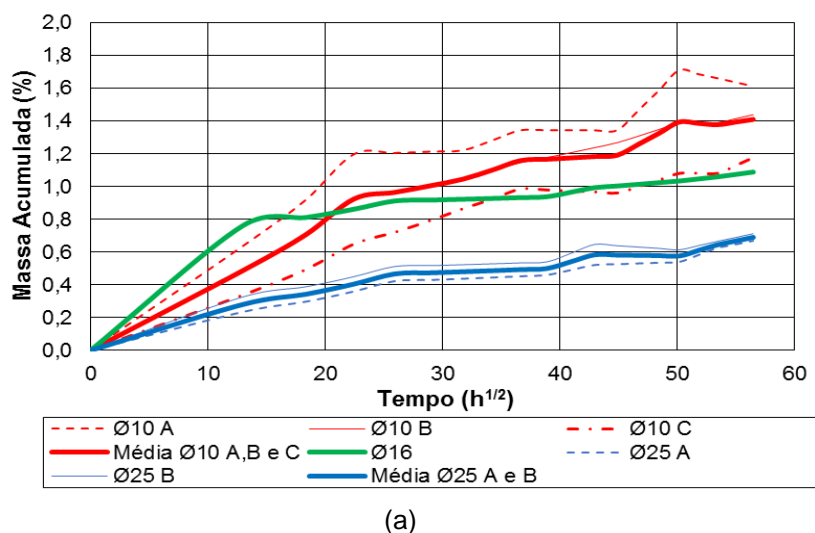
α	coeficiente de difusão (m ² /s)
R	raio do cilindro
M_2	ganho de massa para tempo t_2
M_1	ganho de massa para tempo t_1
M_m	ganho de massa no final do segmento linear
t_2	segundo registo de massa absorvida
t_1	primeiro registo de massa absorvida

A equação 3.3 baseia-se no conhecimento de que, para a maioria dos materiais FRP e difusão de Fick, no início temporal da sorção de humidade, a difusividade é independente do diâmetro dos varões e da concentração.

Foi efetuada uma campanha experimental que consistiu em realizar pesagens durante um longo prazo (1 ano) de amostras GFRP sem recobrimento e com recobrimento de betão e de calda, submersas em soluções agressivas, para se perceber o nível de contaminação consequente da penetração dos reagentes nas amostras e respetivos coeficientes de difusividade. No início do estudo experimental, os provetes foram secos sob temperatura constante.

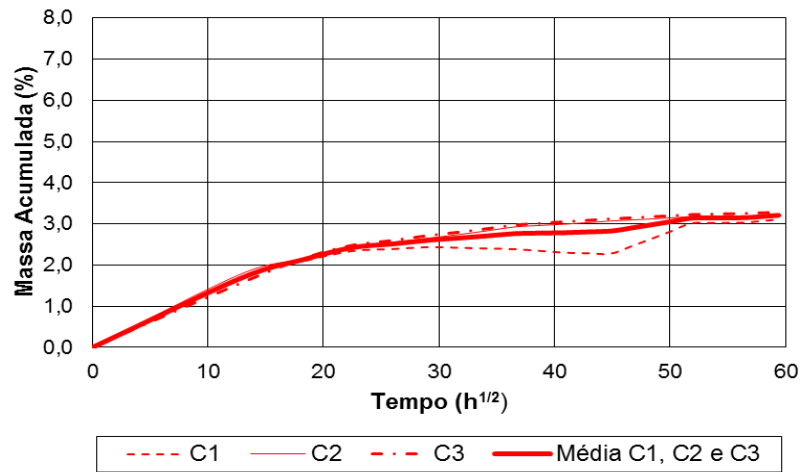
Com os valores das pesagens realizadas durante o período de penetração das soluções, foram traçados gráficos de ganho de massa em função da raiz de tempo para cada uma das amostras. Os ganhos de massa encontrados nos provetes imersos nas soluções foram obtidos após cuidadosa secagem das superfícies externas e comparando com o valor anterior. Os incrementos normalizados pelo valor inicial são apresentados em percentagem.

Foi possível calcular o coeficiente de difusividade através da equação (3.3) referida no capítulo anterior. A aplicação da equação (3.3) ao segmento inicial das curvas leva à estimativa dos coeficientes de difusividade. O coeficiente foi calculado para um tempo selecionado a partir das leituras experimentais. Esse tempo corresponde ao tempo aproximado em que o primeiro patamar das curvas de ganho de massa foi atingido. Abaixo apresentam-se os gráficos obtidos nas Figuras 3.11 a 3.13 através das pesagens e nos Quadros 3.6 a 3.8 os resultados dos coeficientes de difusão.

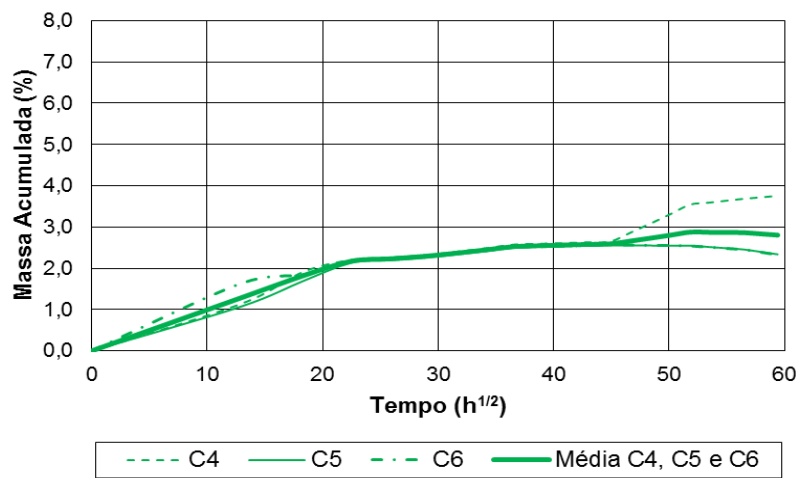


(a) Ambiente salino; (b) Ambiente alcalino; (c) Ambiente sulfatos e cloretos de sódio.

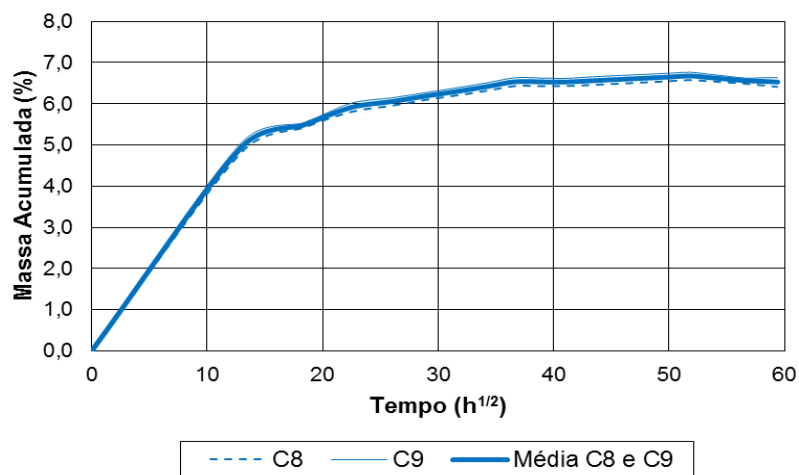
Figura 3.11 – Ganho de massa acumulado para varões de GFRP submersos nos ambientes de exposição



(a)



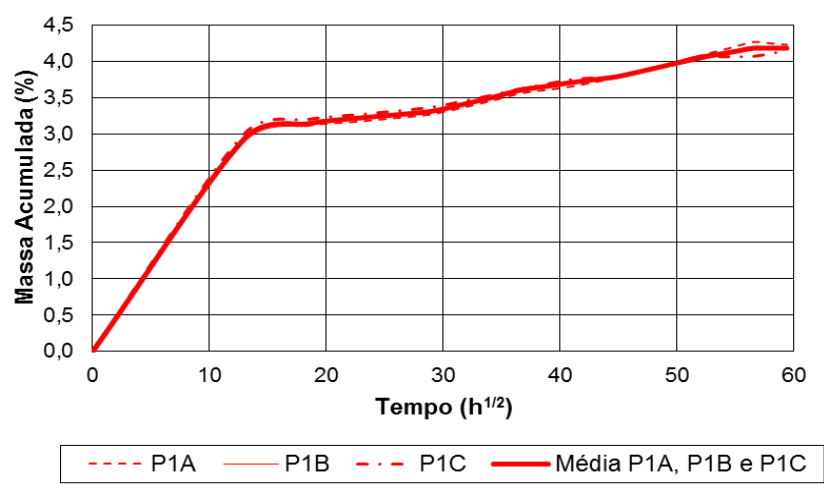
(b)



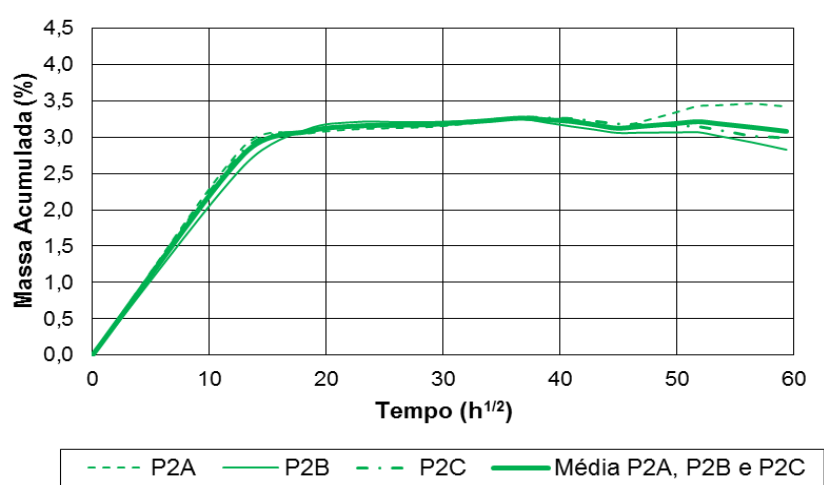
(c)

(a) Ambiente salino; (b) Ambiente alcalino; (c) Ambiente sulfatos e cloretos de sódio.

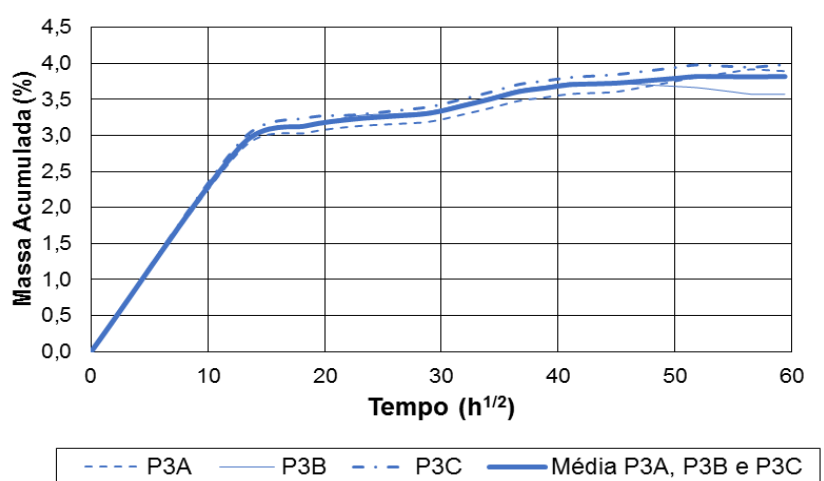
Figura 3.12 – Ganho de massa acumulado para provetes cilíndricos de calda submersos nos ambientes de exposição



(a)



(b)



(c)

(a) Ambiente salino; (b) Ambiente alcalino; (c) Ambiente sulfatos e cloretos de sódio.

Figura 3.13 – Ganho de massa acumulado para provetes cilíndricos de betão submersos nos ambientes de exposição

Quadro 3.6 – Coeficientes de difusão dos varões de GFRP

Amostras	Ambiente de exposição	α [m ² /s]	Média α [m ² /s]
Ø10 A	Salino	0,22E-11	0,02E-10
Ø10 B		0,21E-11	
Ø10 C		0,10E-11	
Ø10 A	Alcalino	0,46E-11	0,04E-10
Ø10 B		0,32E-11	
Ø10 C		0,35E-11	
Ø10 A	Sulfatos e cloretos de sódio	0,25E-11	0,03E-10
Ø10 B		0,17E-11	
Ø10 C		0,50E-11	
Ø16	Salino	1,43E-11	0,14E-10
Ø25 A		1,46E-11	0,17E-10
Ø25 B		2,01E-11	
Ø16	Alcalino	2,08E-11	0,21E-10
Ø25 A		5,07E-11	0,47E-10
Ø25 B		4,26E-11	
Ø16	Sulfatos e cloretos de sódio	1,73E-11	0,17E-10
Ø25 A		2,49E-11	0,29E-10
Ø25 B		3,25E-11	

Quadro 3.7 – Coeficientes de difusão dos provetes de calda com varão de GFRP embutido

Amostras	Ambiente de exposição	α [m ² /s]	Média α [m ² /s]
C1	Salino	2,64E-10	2,67E-10
C2		3,63E-10	
C3		1,75E-10	
C4	Alcalino	1,34E-10	1,84E-10
C5		1,25E-10	
C6		2,92E-10	
C8	Sulfatos e cloretos de sódio	3,59E-10	3,63E-10
C9		3,67E-10	

Quadro 3.8 – Coeficientes de difusão dos provetes de betão com varão de GFRP sobressaído

Amostras	Ambiente de exposição	α [m ² /s]	Média α [m ² /s]
P1A	Salino	6,43E-10	6,48E-10
P1B		6,37E-10	
P1C		6,63E-10	
P2A	Alcalino	6,81E-10	6,19E-10
P2B		5,36E-10	
P2C		6,41E-10	
P3A	Sulfatos e cloretos de sódio	6,33E-10	6,25E-10
P3B		6,12E-10	
P3C		6,31E-10	

3.4.1.2. Ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios X é um método de análise química elementar, que fornece informação sobre os elementos químicos constituintes de um material, mas não permite saber como esses elementos químicos se organizam sob forma de composto químico. Este método é parcamente indicatório, no entanto, é usado em estudos de restauro e conservação devido a algumas vantagens que apresenta em relação a outros métodos. Permite detetar elementos químicos em concentrações muito reduzidas presentes no material e quantificá-los. O método baseia-se no facto de a exposição de um material a raios X provocar a emissão de raios X pelos elementos químicos presentes no material. Esta radiação, dita de fluorescência, é registada num espectro e possui apenas determinados valores de energia, a que correspondem os picos no espectro, conforme os elementos químicos presentes no material. Assim, por comparação com tabelas, é possível proceder-se à identificação desses elementos. Por outro lado, a intensidade dos raios X emitidos com uma certa energia, ou seja, a altura de um pico no espectro, pode ser relacionada com a concentração do elemento responsável pela emissão [37].

O objetivo deste ensaio é identificar os elementos químicos que constituem as amostras de calda e de betão antes e após envelhecimento. Para realizar o ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X, recorreu-se ao Departamento de Conservação e Restauro da FCT UNL, cujo equipamento disponibilizado sem contrapartida foi o ARTAX Bruker, Figura 3.14. O ensaio encontra-se em conformidade com o manual do utilizador do equipamento da *Burker advanced X ray solutions*, onde normas, regulamentação e procedimentos de ensaio podem ser consultados [38]. Existe também literatura de investigação sobre a teoria da técnica FRX [39].

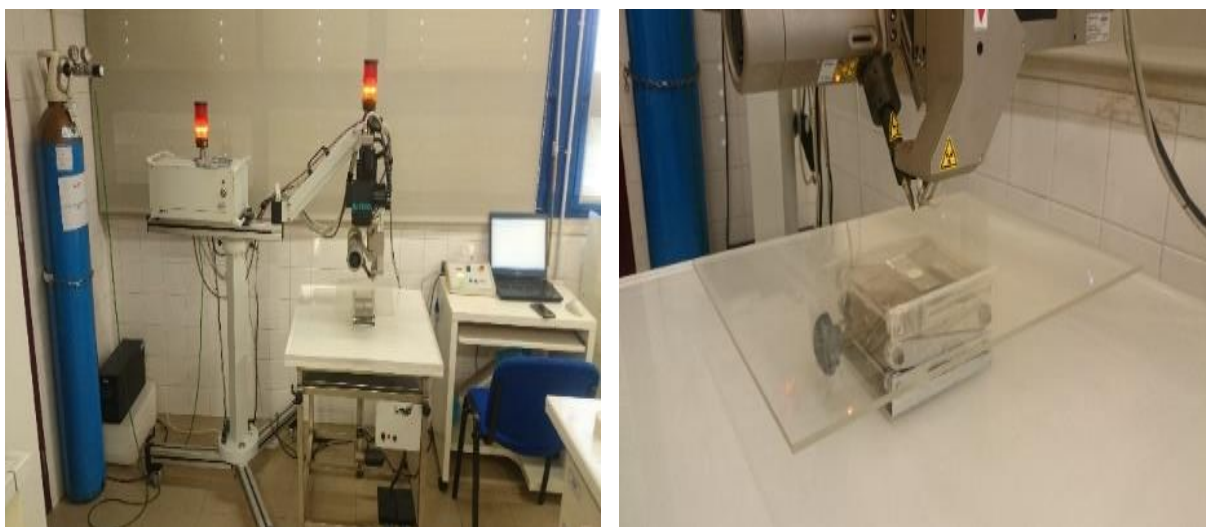


Figura 3.14 – Equipamento de espectrometria de fluorescência de raios X ARTAX Bruker

Previamente prepararam-se amostras em pó de calda e de betão. Dos provetes cilíndricos submersos nas soluções 1, 2 e 3, amostras em pó foram recolhidas, duas em cada localização, a 1 e 2 cm da periferia e com 1 cm de profundidade, como mostra a Figura 3.15. Nos provetes de referência de calda e de betão foi recolhido uma amostra em pó num ponto aleatório da secção. No Quadro 3.9 encontram-se as amostras recolhidas para análise.



Figura 3.15 – Recolha das amostras em pó da calda e do betão

Quadro 3.9 – Amostras de calda e de betão recolhidas para ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X

Amostra	Ambiente de exposição	Período de exposição (horas)	Distância da periferia	
			L = 1 cm	L = 2 cm
Calda	Salino	2500	2	2
		5800		
	Alcalino	2500		
		5800		
	Sulfatos e cloretos de sódio	2500		
		5800		
Betão	Salino	2500	2	2
		5800		
	Alcalino	2500		
		5800		
	Sulfatos e cloretos de sódio	2500		
		5800		

Os resultados de concentração dos elementos químicos detetados nas amostras de calda encontram-se nos Quadros 3.10 a 3.12 e de betão nos Quadros 3.13 a 3.15.

Quadro 3.10 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de calda de referência e submersas no ambiente salino

Elemento químico	Referência	Distância da periferia			
		2500 horas		5800 horas	
		L = 1cm	L = 2 cm	L = 1cm	L = 2 cm
Si	0,32	0,28	0,29	0,34	0,26
S	0,23	0,20	0,16	0,17	0,17
Cl	0,00	0,35	0,17	0,92	0,51
K	1,22	0,97	1,11	0,97	1,05
Ca	89,14	88,87	88,70	86,89	87,43
Fe	9,09	9,33	9,56	10,72	10,58

Quadro 3.11 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de calda de referência e submersas no ambiente alcalino

Elemento químico	Referência	Distância da periferia			
		2500 horas		5800 horas	
		L = 1cm	L = 2 cm	L = 1cm	L = 2 cm
Si	0,32	0,28	0,29	0,33	0,30
S	0,23	0,20	0,20	0,19	0,18
Cl	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
K	1,22	0,99	1,04	1,63	1,70
Ca	89,14	88,60	87,39	87,30	87,76
Fe	9,09	9,93	11,08	10,55	10,04

Quadro 3.12 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de calda de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio

Elemento químico	Referência	Distância da periferia			
		2500 horas		5800 horas	
		L = 1cm	L = 2 cm	L = 1cm	L = 2 cm
Si	0,32	0,32	0,30	0,33	0,28
S	0,23	0,17	0,18	0,18	0,15
Cl	0,00	0,14	0,08	0,37	0,34
K	1,22	1,20	1,19	1,21	1,11
Ca	89,14	86,28	88,67	87,63	88,38
Fe	9,09	11,90	9,59	10,27	9,73

Quadro 3.13 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de betão de referência e submersas no ambiente salino

Elemento químico	Referência	Distância da periferia			
		2500 horas		5800 horas	
		L = 1cm	L = 2 cm	L = 1cm	L = 2 cm
Si	1,24	0,65	3,59	1,91	1,48
S	0,10	0,14	0,17	0,10	0,13
Cl	0,00	0,09	0,14	0,24	0,38
K	1,27	0,79	2,68	1,13	2,03
Ca	93,90	94,52	77,84	89,77	84,50
Fe	3,50	3,81	15,59	6,84	11,29

Quadro 3.14 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de betão de referência e submersas no ambiente alcalino

Elemento químico	Referência	Distância da periferia			
		2500 horas		5800 horas	
		L = 1cm	L = 2 cm	L = 1cm	L = 2 cm
Si	1,24	1,62	1,60	1,30	3,25
S	0,10	0,12	0,21	0,16	0,11
Cl	0,00	0,02	0,01	0,02	0,02
K	1,27	1,79	2,96	2,03	2,98
Ca	93,90	85,75	84,32	88,27	80,25
Fe	3,50	10,71	10,91	8,22	13,40

Quadro 3.15 – Concentração percentual dos elementos químicos das amostras de betão de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio

Elemento químico	Referência	Distância da periferia			
		2500 horas		5800 horas	
		L = 1cm	L = 2 cm	L = 1cm	L = 2 cm
Si	1,24	2,31	1,25	1,70	2,03
S	0,10	0,13	0,13	0,15	0,13
Cl	0,00	0,09	0,06	0,44	0,27
K	1,27	1,14	1,61	1,22	1,06
Ca	93,90	90,03	88,39	79,80	88,09
Fe	3,50	6,31	8,57	16,69	8,43

Com o apoio das empresas Lusical e Secil, foram realizadas análises químicas em amostras de betão, nomeadamente: amostras de referência; amostras sujeitas a ambiente salino às 2500 e 5800 horas e amostras sujeitas a ambiente alcalino às 2500 e 5800 horas. Porém os resultados obtidos não correspondem ao esperado, visto que não foram detetados todos os elementos, conforme se verifica nos resultados representados nos Anexos D e E.

3.4.1.3. Ensaio de determinação de massa volúmica aparente e porosidade aberta

Este tipo de ensaio tem como principal objetivo determinar a massa volúmica aparente e porosidade aberta das amostras de calda e de betão, antes e após contaminação dos ambientes de exposição. Foi feito em conformidade com a norma portuguesa NP EN 1936:2008 [40]. O procedimento do ensaio e expressões de cálculo da massa volúmica aparente e porosidade aberta podem ser consultados na norma. A preparação das amostras para ensaio consistiu em fragmentar os provetes cilíndricos de calda e betão previamente concebidos, Figura 3.16, de modo a obter uma amostra com volume e peso dentro das capacidades da balança hidrostática.



(a) Provetes; (b) Amostras fragmentadas.

Figura 3.16 – Amostras de calda e de betão utilizadas no ensaio para determinação de porosidade aberta e massa volúmica aparente

Os resultados obtidos de massa volúmica aparente e porosidade aberta das amostras de calda e de betão, antes e após envelhecimento, encontram-se no Quadro 3.16. A Figura 3.17 (a)-(h) apresenta procedimentos de ensaio e equipamentos utilizados.

Quadro 3.16 – Valores de massa volúmica aparente e porosidade aberta da calda e do betão antes e após envelhecimento

Amostra	Ambiente de exposição	Período de exposição (horas)	Massa Volúmica Média Aparente (kg/m ³)	Porosidade Média Aberta (%)
Calda	Referência	0	1636,784	30,66
	Salino	2500	1619,758	30,57
		5800	1599,378	29,69
	Alcalino	2500	1626,194	30,34
		5800	1642,369	29,42
	Sulfatos e cloretos de sódio	2500	1688,204	29,69
		5800	1700,065	25,39
Betão	Referência	0	2291,541	10,28
	Salino	2500	2303,383	9,82
		5800	2327,685	8,52
	Alcalino	2500	2291,478	10,46
		5800	2318,531	8,54
	Sulfatos e cloretos de sódio	2500	2280,808	10,48
		5800	2304,539	8,70



(a) Secagem das amostras; (b) Colocação de amostras no exsicador; (c) Pesagem da massa seca; (d) Remoção do ar contido nos poros da amostra através de exsicador e bomba de extração de ar; (e) Imersão das amostras colocando água no recipiente; (f) Remoção do excesso de água superficial da amostra através de pano húmido; (g) Pesagem da massa saturada; (h) Colocação da amostra na balança hidrostática para obtenção de massa hidrostática.

Figura 3.17 – Procedimentos de ensaio para determinação de massa volúmica aparente e porosidade aberta

3.4.1.4. Ensaio de porosimetria de mercúrio

O ensaio de porosimetria de mercúrio consiste em fechar uma amostra porosa num recipiente, desgaseificá-la e mergulhá-la em mercúrio. Para cada valor de pressão aplicado ao mercúrio, mede-se o volume de mercúrio forçado a entrar nos poros da amostra. A determinação da distribuição de tamanhos de poros é feita a partir do volume de mercúrio que foi forçado a entrar nos poros em função da pressão aplicada. Através desta técnica, podem-se determinar outros parâmetros importantes na caracterização de meios porosos, tais como: volume total de poros; diâmetro médio dos poros; área superficial total; massa específica aparente e real da amostra.

Este ensaio não foi realizado de acordo com qualquer referencial normativo devido à irregularidade da amostragem utilizada. No entanto, a norma ISA 15901-1 [41] apresenta algumas generalidades sobre a técnica e referências adotadas no ensaio. Na literatura de investigação encontram-se artigos sobre a técnica [42,43].

Recorreu-se ao laboratório de análises da rede de química e tecnologia do Departamento de Química da FCT UNL (REQUIMTE), para realizar o ensaio de porosimetria de mercúrio. O equipamento utilizado foi o porosímetro Micromeritics, modelo AutoPore IV 9500, Figura 3.18.

No Quadro 3.17 encontram-se as amostras analisadas no ensaio. Para o mesmo tipo de amostra, foram feitos dois ensaios, um onde a amostra é sujeita a um pré-tratamento e outro onde não há qualquer tipo de pré-tratamento. O pré-tratamento consistiu numa secagem a 105 °C da amostra durante 3 dias. A análise de resultados deste trabalho debruça-se fundamentalmente nas amostras com pré-tratamento, por permitirem melhor comparação para diferentes contaminações.

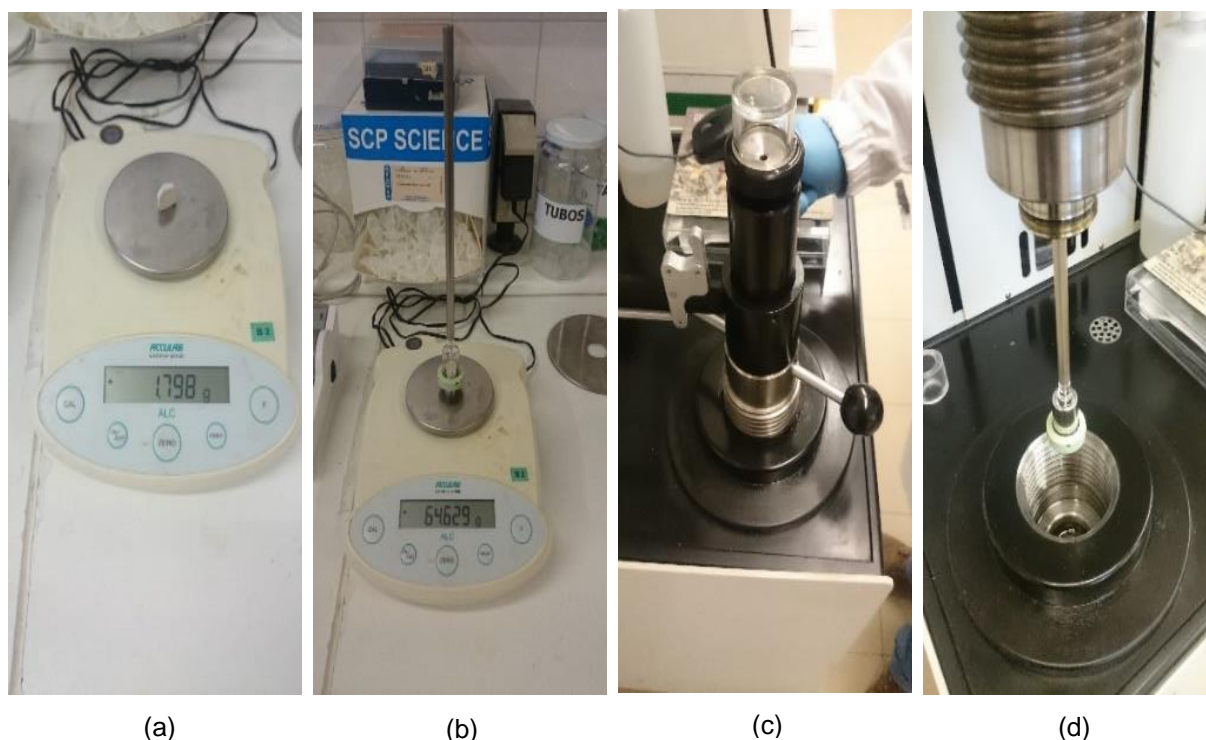
A Figura 3.19 mostra procedimentos de ensaio. Os parâmetros do penetrómetro do porosímetro utilizados neste ensaio encontram-se no Anexo F.



Figura 3.18 – Porosímetro de mercúrio Micromeritics modelo AutoPore IV 9500

Quadro 3.17 – Amostras utilizadas no ensaio de porosimetria de mercúrio

Amostra	Período de exposição (horas)	Ambiente de exposição	Pré-tratamento	
			Secagem a 105 °C	Nenhum
Calda	0	Referência	1	1
	5800	Salino		
		Alcalino		
		Sulfatos e cloretos de sódio		
Betão	0	Referência	1	1
	5800	Salino		
		Alcalino		
		Sulfatos e cloretos de sódio		



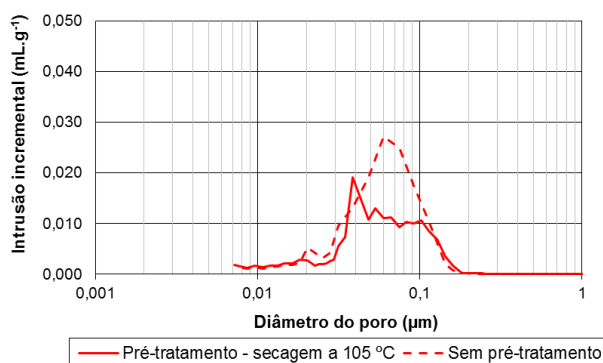
(a) Pesagem da amostra; (b) Pesagem do penetrômetro com a amostra; (c) Colocação do penetrômetro na câmara de alta pressão; (d) Recolha do penetrômetro com amostra envolvida em mercúrio.

Figura 3.19 – Procedimentos de ensaio de porosimetria de mercúrio

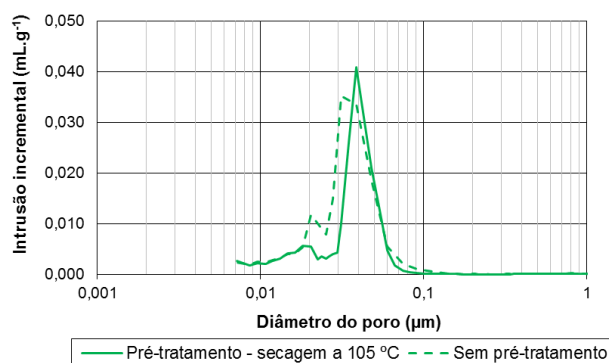
Após realização do ensaio, são apresentados no Quadro 3.18 os parâmetros obtidos de cada amostra de calda e de betão, em particular a área total de poros, o diâmetro do poro médio e a porosidade. Nas Figuras 3.20 a 3.23 encontram-se os gráficos de intrusão incremental em função do diâmetro do poro.

Quadro 3.18 – Parâmetros obtidos através do ensaio de porosimetria de mercúrio

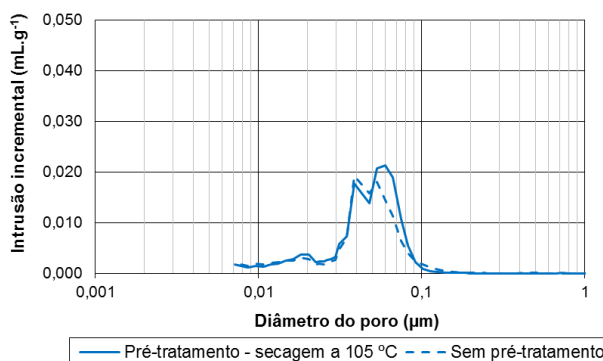
Amostra	Pré-Tratamento	Período de exposição (horas)	Ambiente de exposição	Área total de poros (m ² /g)	Diâmetro do poro médio (μm)	Porosidade (%)
Calda	Secagem a 105 °C	0	Referência	16,654	0,0443	30,95
		5800	Salino	24,082	0,0307	30,38
			Alcalino	17,852	0,0381	29,06
			Sulfatos e cloretos de sódio	21,819	0,0275	26,11
	-	0	Referência	14,152	0,0448	27,88
		5800	Salino	23,286	0,0294	28,71
			Alcalino	16,718	0,0362	27,27
			Sulfatos e cloretos de sódio	21,737	0,0239	23,56
Betão	Secagem a 105 °C	0	Referência	2,586	0,0700	10,48
		5800	Salino	3,359	0,0490	9,60
			Alcalino	3,898	0,0466	10,25
			Sulfatos e cloretos de sódio	3,354	0,0552	10,63
	-	0	Referência	2,492	0,0703	9,11
		5800	Salino	3,696	0,0348	7,55
			Alcalino	2,648	0,0586	8,13
			Sulfatos e cloretos de sódio	3,754	0,0405	8,76



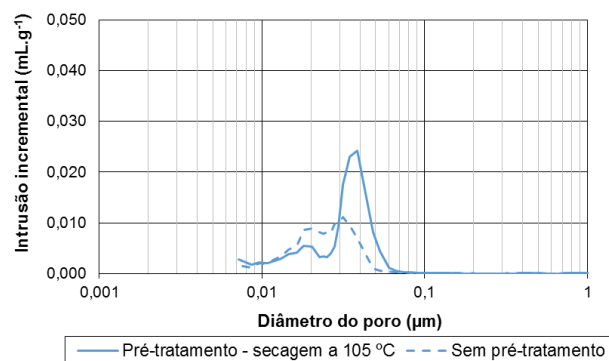
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Referência; (b) Salino; (c) Alcalino; (d) Sulfatos e cloretos de sódio.

Figura 3.20 – Gráficos de intrusão incremental em função do diâmetro do poro das amostras de calda submersas 5800 horas nos ambientes de exposição

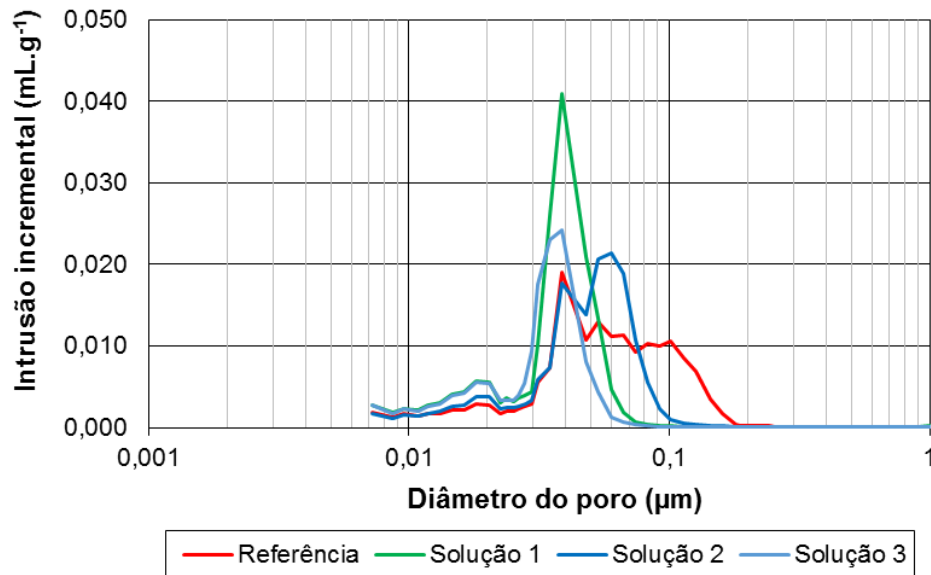
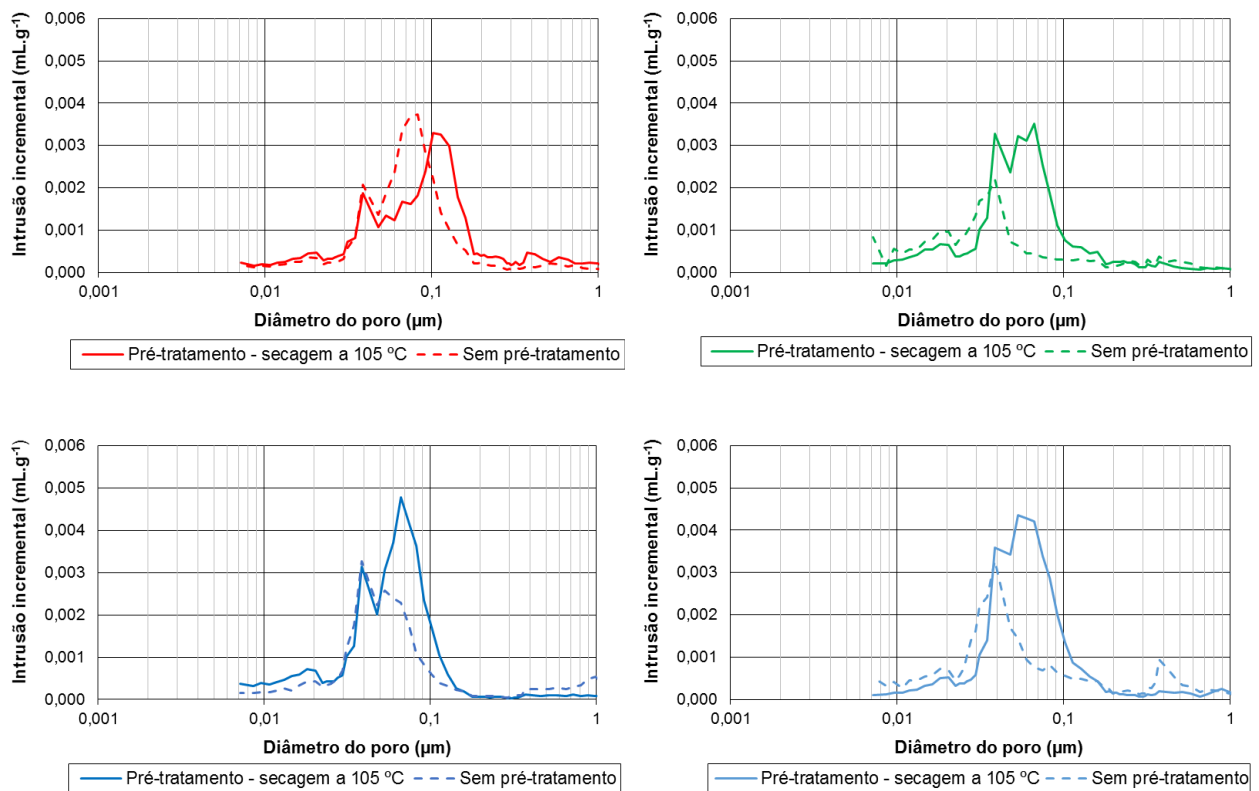


Figura 3.21 – Gráficos de intrusão incremental em função do diâmetro do poro das amostras de calda com pré-tratamento de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição



(a) Referência. (b) Salino; (c) Alcalino; (d) Sulfatos e cloretos de sódio.

Figura 3.22 – Gráficos de intrusão incremental em função do diâmetro do poro das amostras de betão submersas 5800 horas nos ambientes de exposição

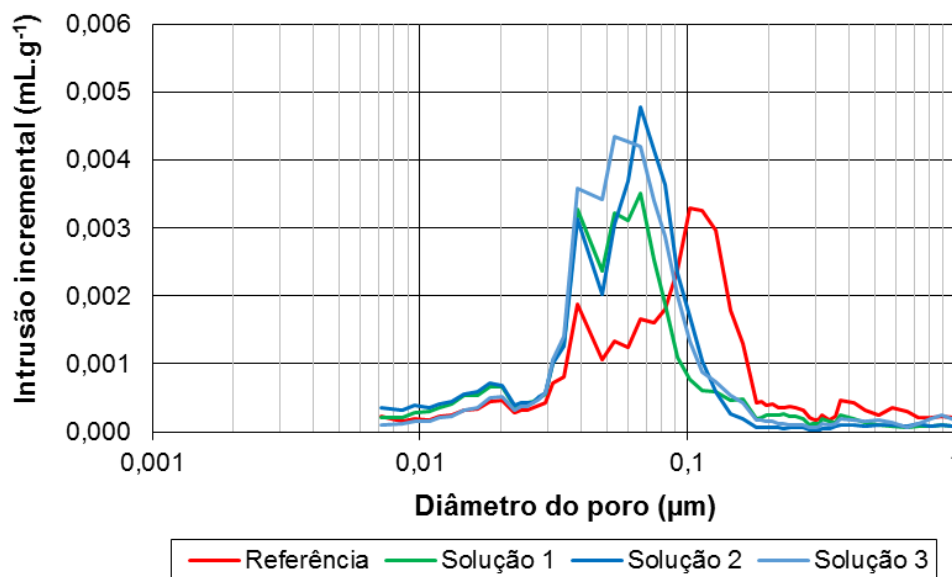
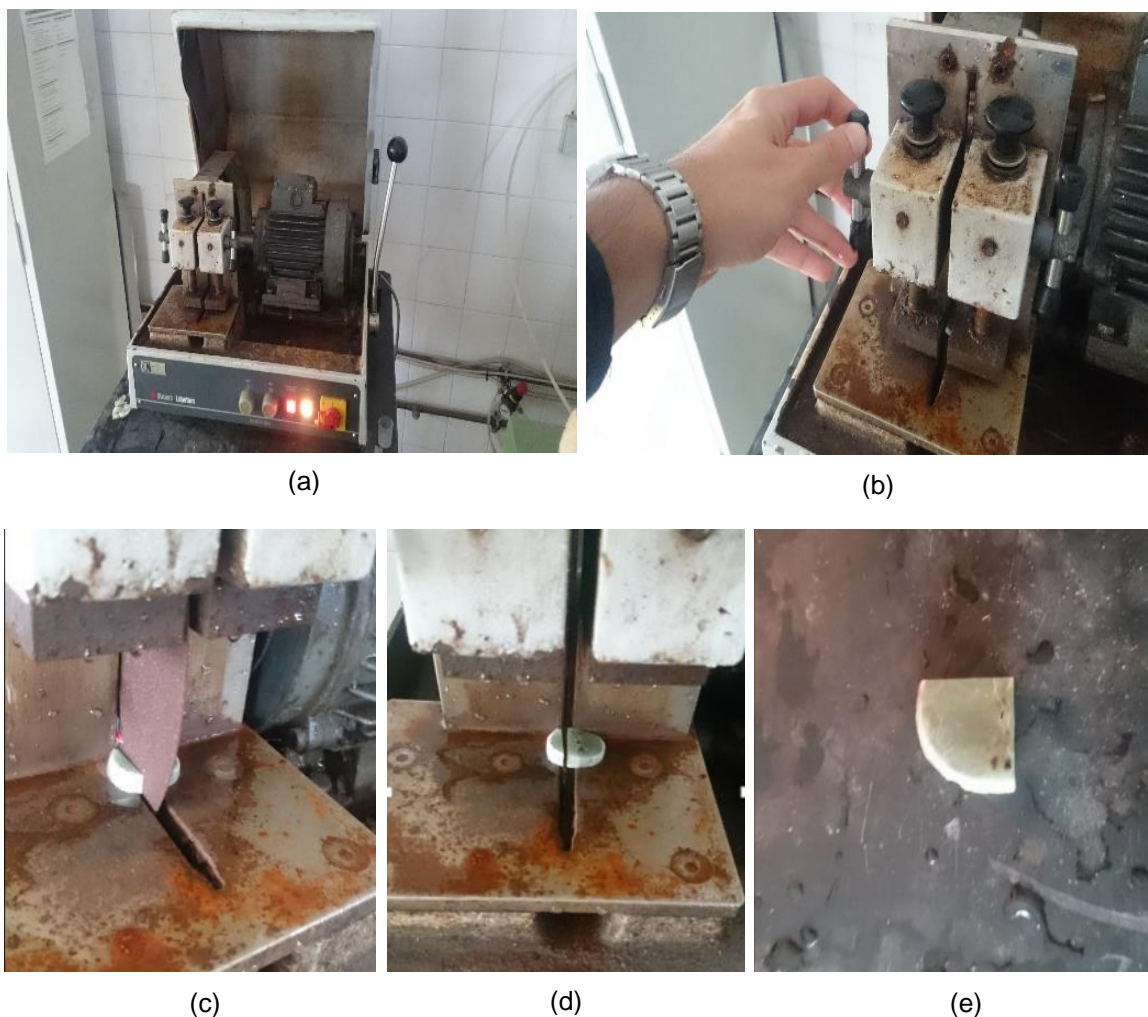


Figura 3.23 – Gráficos de intrusão incremental em função do diâmetro do poro das amostras de betão com pré-tratamento de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição

3.4.1.5. Microscópio eletrónico de varrimento

O microscópio eletrónico de varrimento (em inglês scanning electron microscope, SEM) é um microscópio apto a produzir imagens de alta resolução da superfície de uma amostra. É possível avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra através da aparência tridimensional característica das imagens SEM. Estudos [15,24,29] mostram que é uma análise muito utilizada para observar as matrizes e fibras de compósitos. No âmbito do tema da dissertação, foram recolhidas imagens SEM de amostras de GFRP na periferia e no centro, antes e após contaminação, para compreender e observar a evolução de degradação.

A análise SEM de amostras de GFRP foi feita pela PARALAB, Equipamentos Industriais e de Laboratório, S.A.. A preparação das amostras consistiu na realização de cortes e polimento das faces transversais dos varões de 25 mm de diâmetro, antes e após contaminação. Os varões embutidos nos provetes de calda e de betão foram removidos, desfazendo o recobrimento de calda e de betão. O objetivo dos cortes é reduzir a amostra de maneira a que possa ser introduzida no porta-amostra do microscópio. Os cortes foram executados no equipamento de corte Struers Labotom, Figura 3.24 (a), que se encontra nas instalações do CENIMAT, Centro de Investigação em Materiais da FCT UNL. A Figura 3.24 apresenta os procedimentos de corte das amostras de GFRP para análise SEM.



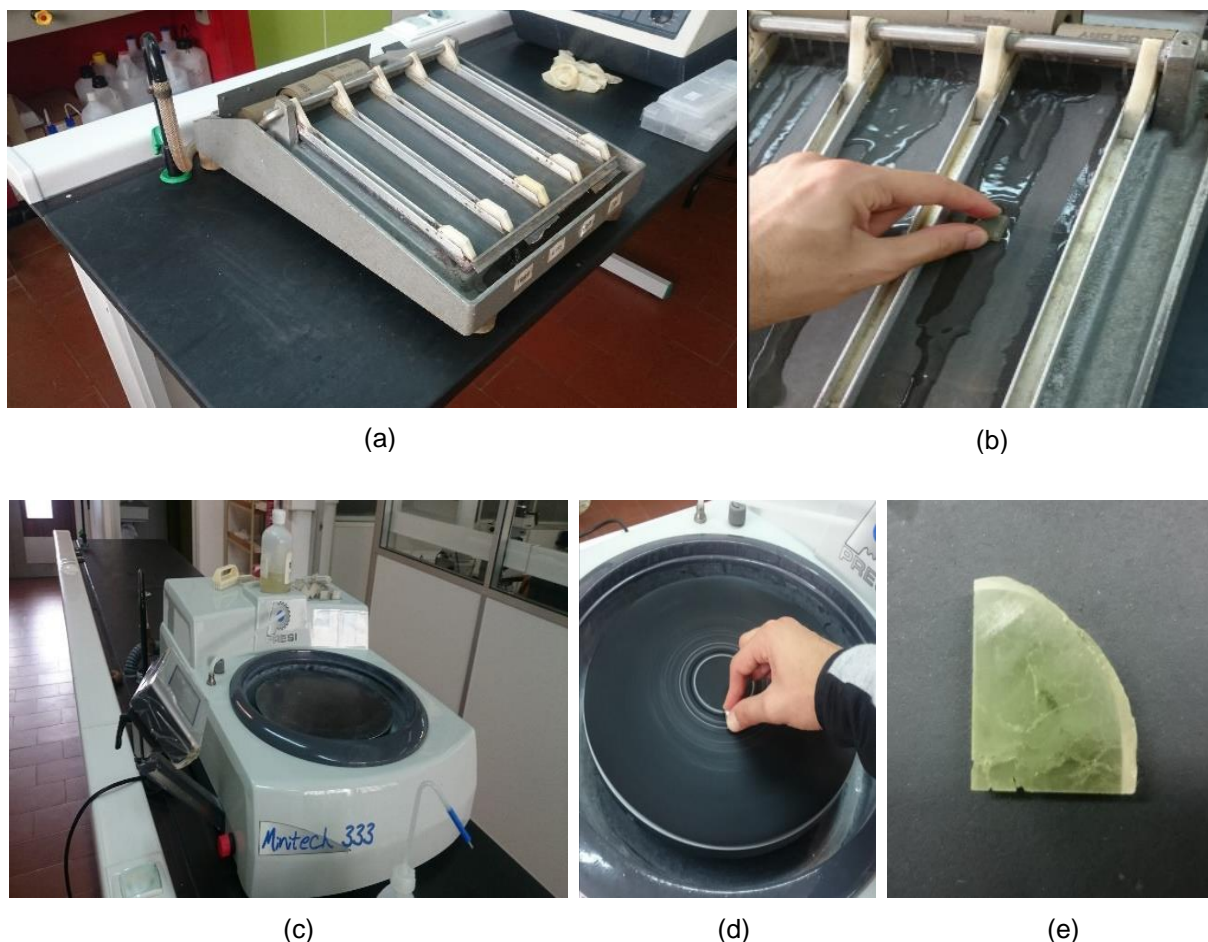
(a) Equipamento de corte Stuers Labotom (CENIMAT); (b) Sistema de fixação da amostra; (c) Linha de corte por onde a serra efetua o corte na amostra; (d) 1º corte da amostra de GFRP; (e) Amostra de GFRP para análise SEM.

Figura 3.24 – Procedimentos de corte nas amostras de GFRP para análise SEM

Recorreu-se também às instalações do Departamento de Materiais para utilizar o equipamento de polimento usado em metais. A mesma técnica de polimento foi utilizada nas amostras de GFRP. Utilizou-se o equipamento de polimento Struers constituído por um conjunto de quatro lixas de granulação diferente, Figura 3.25 (a). O processo de polimento consiste em polir a amostra de GFRP desde a lixa com granulação grossa até à de granulação fina. Inicia-se o polimento na lixa com granulação mais grossa. O polimento é feito movendo a amostra contra a superfície da lixa na direção paralela ao seu comprimento, com amplitude de movimentos grande, Figura 3.25 (b). São feitos 20 a 30 movimentos e procede-se para a seguinte lixa. A posição da face polida da amostra gira 90° em relação à posição onde foi aplicado o polimento inicial. São realizados novamente 20 a 30 movimentos e procede-se da mesma maneira para as últimas duas lixas.

Finaliza-se o polimento da amostra, recorrendo-se ao equipamento Presi Minitech, Figura 3.25 (c). O aparelho é composto por uma lixa circular. A lixa circular possui uma granulação menor que as

anteriores, permitindo aperfeiçoar o polimento da amostra. A lixa circular gira em torno de uma base do equipamento. A amostra de GFRP é colocada e mantida no mesmo ponto da lixa circular, enquanto esta gira, Figura 3.25 (d). A posição da face polida gira 90° novamente em relação à posição onde foi aplicado o polimento na lixa anterior. A Figura 3.25 (e) mostra as amostras de GFRP após polimento.



(a) Equipamento de polimento Struers (Departamento de Materiais); (b) Polimento das amostras de GFRP nas diferentes lixas de granulação; (c) Equipamento de polimento Presi Minitech 333 (Departamento de Materiais); (d) Polimento final da amostra em lixa circular em movimento; (e) Amostra de GFRP polida.

Figura 3.25 – Polimento das amostras de GFRP para análise SEM

O Quadro 3.19 apresenta as amostras polidas para serem analisadas em SEM. Foi analisada uma amostra para cada caso diferente.

Quadro 3.19 – Amostras de GFRP para análise SEM

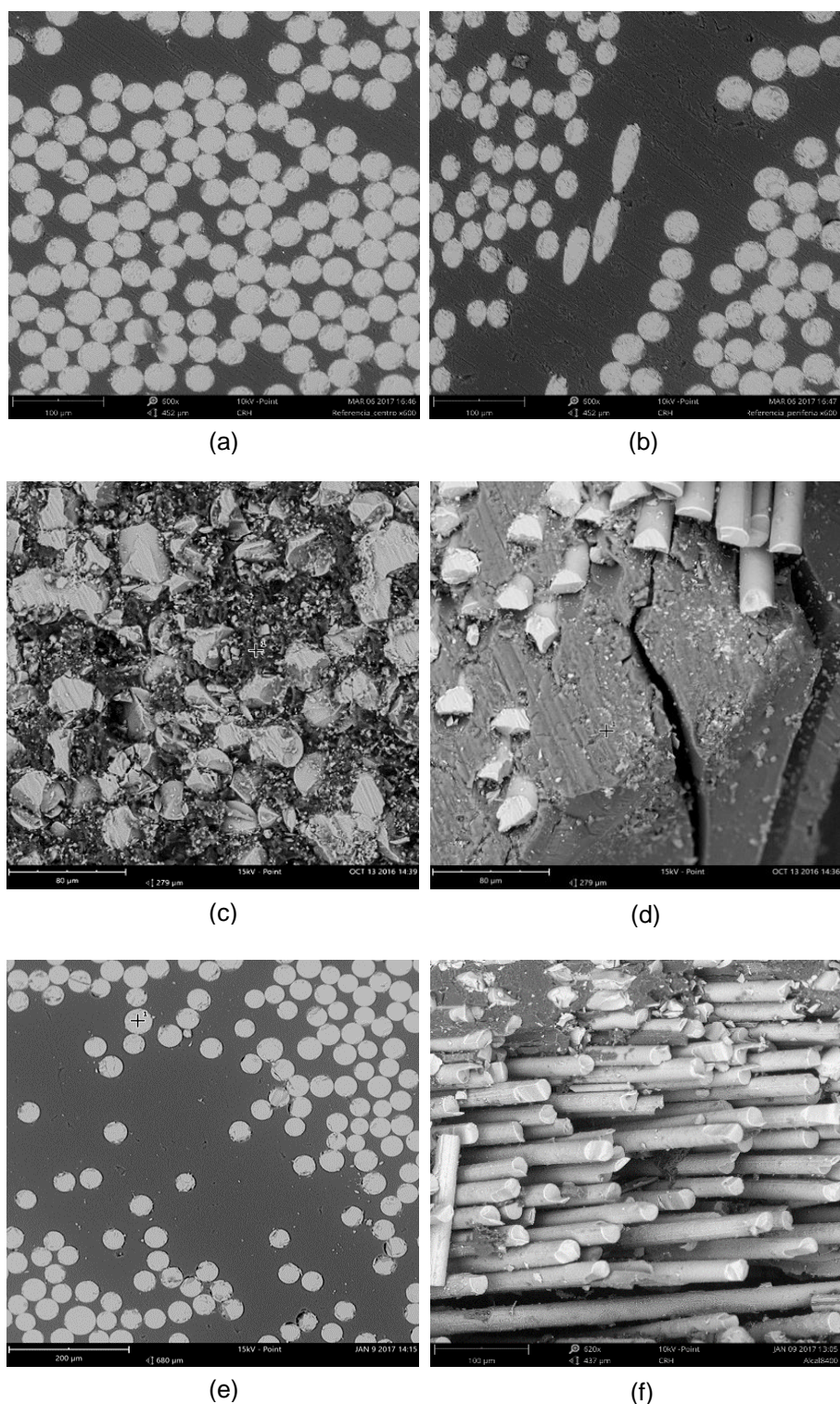
Amostra	Ambiente de exposição	Período de exposição (horas)
Sem recobrimento	Referência	0
	Alcalino	4500
	Salino	8400
	Alcalino	
	Sulfatos e cloretos de sódio	
Recobrimento de calda	Alcalino	2500
	Sulfatos e cloretos de sódio	
	Salino	5800
	Alcalino	
	Sulfatos e cloretos de sódio	
Recobrimento de betão	Alcalino	2500
	Salino	5800
	Alcalino	
	Sulfatos e cloretos de sódio	

O microscópio utilizado pela PARALAB foi o Phenom ProX, Figura 3.26. Com o microscópio Phenom ProX, as estruturas de amostras podem ser fisicamente examinadas e sua composição elementar determinada. As especificações do microscópio encontram-se nas referências bibliográficas [34].



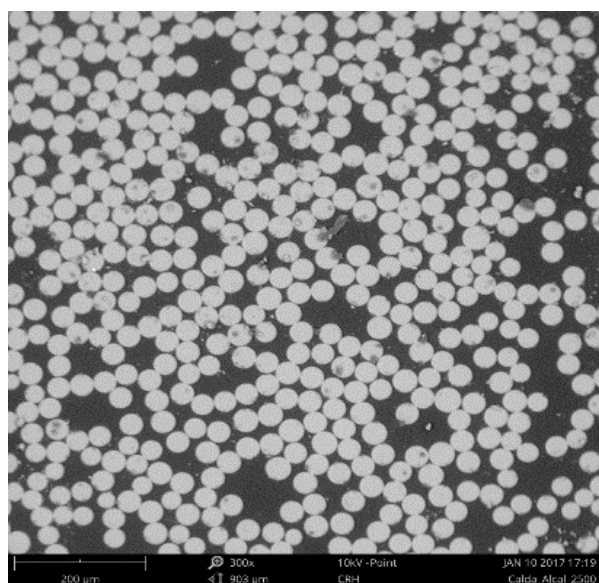
Figura 3.26 – Equipamento SEM Phenom ProX [44]

Através de métodos de cálculo que permitem estimar as proporções de eventuais compostos químicos detetados nas amostras pelo equipamento, é feita uma análise estequiométrica, usada frequentemente para balancear equações químicas. Essa análise encontra-se em literatura como [45]. Deste modo, é possível fazer uma análise qualitativa dos compostos químicos detetados antes e após contaminação das amostras de GFRP. Nas Figuras 3.27 a 3.29 encontram-se imagens obtidas através de SEM das amostras expostas ao ambiente alcalino, onde foi possível observar degradações significativas. As restantes imagens SEM encontram-se no Anexo G. Nos Quadros 3.20 a 3.28 são apresentados as concentrações de moléculas e os elementos químicos detetadas em cada amostra de GFRP.

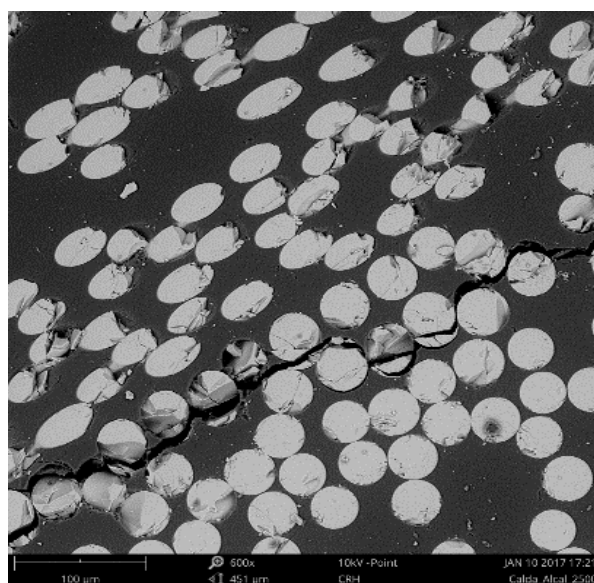


(a) Referência, centro da amostra; (b) Referência, periferia da amostra; (c) Período de exposição de 4500 horas, centro da amostra; (d) Período de exposição de 4500 horas, periferia da amostra; (e) Período de exposição de 8400 horas, centro da amostra; (f) Período de exposição de 8400 horas, periferia da amostra.

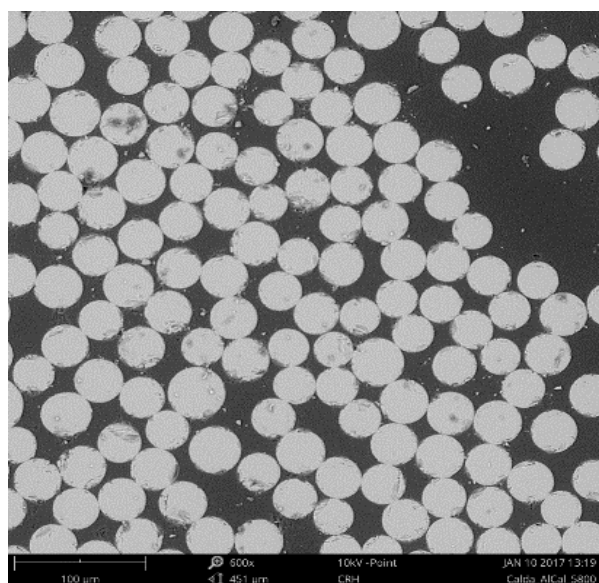
Figura 3.27 – Imagens SEM de amostras de GFRP sem recobrimento de referência e expostas ao ambiente alcalino durante 4500 e 8400 horas



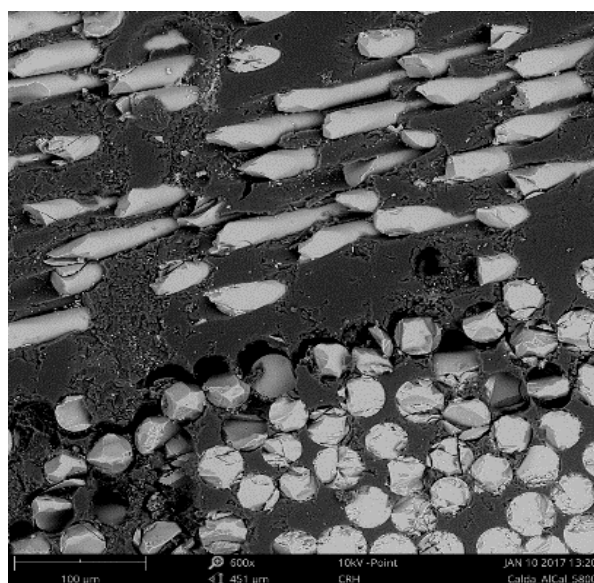
(a)



(b)



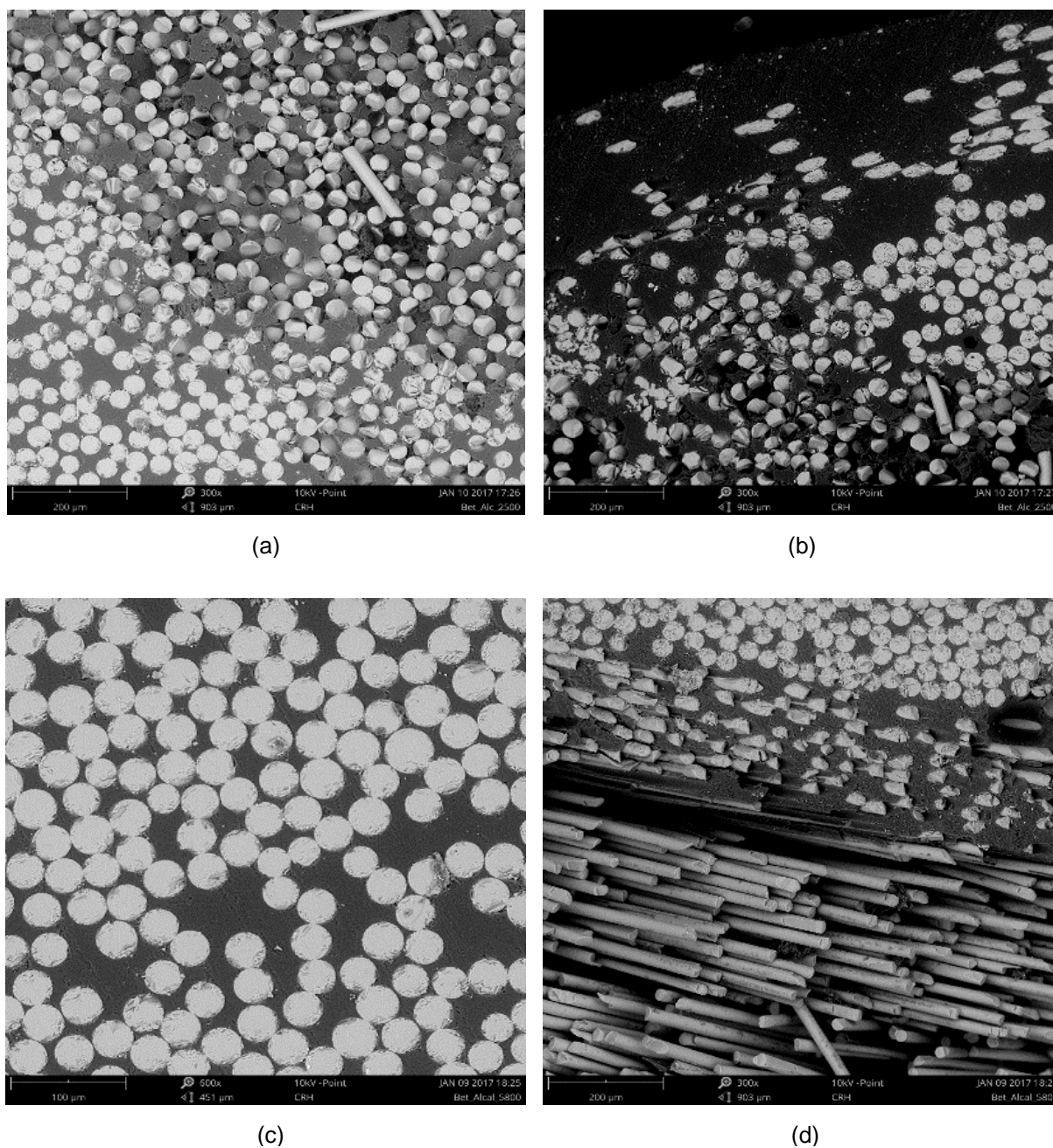
(c)



(d)

(a) Período de exposição de 2500 horas, centro da amostra; (b) Período de exposição de 2500 horas, periferia da amostra; (c) Período de exposição de 5800 horas, centro da amostra; (d) Período de exposição de 5800 horas, periferia da amostra.

Figura 3.28 – Imagens SEM de amostras de GFRP com recobrimento de calda expostas ao ambiente alcalino durante 2500 e 5800 horas



(a) Período de exposição de 2500 horas, centro da amostra; (b) Período de exposição de 2500 horas, periferia da amostra; (c) Período de exposição de 5800 horas, centro da amostra; (d) Período de exposição de 5800 horas, periferia da amostra.

Figura 3.29 – Imagens SEM de amostras de GFRP com recobrimento de betão expostas ao ambiente alcalino durante 2500 e 5800 horas

Quadro 3.20 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP sem recobrimento de referência e submersas no ambiente salino

Moléculas e elementos químicos	Período de exposição							
	0 horas				8400 horas			
	Fibra de vidro		Resina		Fibra de vidro		Resina	
	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia
SiO ₂	59,67	60,22	39,77	39,45	59,61	58,59	26,83	37,43
Ca	15,64	15,01	11,14	11,51	13,70	15,52	6,27	10,36
Al ₂ O ₃	16,64	17,01	11,36	11,38	17,16	16,72	8,98	11,73
C	3,91	3,35	33,05	32,71	5,12	5,20	52,72	35,93
Mg	2,89	3,08	1,73	2,06	3,21	2,91	2,21	2,21
Na	0,86	0,93	0,00	0,39	0,91	0,54	0,68	0,97
K	0,42	0,41	0,00	0,00	0,31	0,40	0,22	0,40
Cl	0,00	0,00	2,96	2,25	0,00	0,08	1,70	0,58
S	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,07	0,41	0,43

Quadro 3.21 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP sem recobrimento de referência e submersas no ambiente alcalino

Moléculas e elementos químicos	Período de exposição							
	0 horas				8400 horas			
	Fibra de vidro		Resina		Fibra de vidro		Resina	
	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia
SiO ₂	59,67	60,22	39,77	39,45	59,72	57,41	25,45	31,10
Ca	15,64	15,01	11,14	11,51	14,29	16,63	6,22	9,40
Al ₂ O ₃	16,64	17,01	11,36	11,38	17,23	15,65	8,12	9,59
C	3,91	3,35	33,05	32,71	4,47	6,56	56,68	46,57
Mg	2,89	3,08	1,73	2,06	3,11	2,63	1,63	1,20
Na	0,86	0,93	0,00	0,39	0,76	0,28	0,32	0,36
K	0,42	0,41	0,00	0,00	0,40	0,86	0,16	1,42
Cl	0,00	0,00	2,96	2,25	0,02	0,00	1,05	0,21
S	0,00	0,00	0,00	0,28	0,02	0,00	0,38	0,17

Quadro 3.22 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP sem recobrimento de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio

Moléculas e elementos químicos	Período de exposição							
	0 horas				8400 horas			
	Fibra de vidro		Resina		Fibra de vidro		Resina	
	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia
SiO ₂	62,34	61,78	39,77	39,45	59,77	61,41	35,47	34,47
Ca	21,53	20,61	11,14	11,51	15,45	13,74	10,42	10,50
Al ₂ O ₃	14,00	15,08	11,36	11,38	16,71	18,40	9,96	11,06
C	0,00	0,00	33,05	32,71	3,86	1,97	39,30	38,15
Mg	1,67	1,99	1,73	2,06	2,91	3,54	1,45	2,28
Na	0,00	0,00	0,00	0,39	0,75	0,44	0,21	1,11
K	0,47	0,53	0,00	0,00	0,44	0,44	0,53	0,51
Cl	0,00	0,00	2,96	2,25	0,07	0,00	2,67	0,95
S	0,00	0,00	0,00	0,28	0,05	0,08	0,00	1,00

Quadro 3.23 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de calda de referência e submersas no ambiente salino

Moléculas e elementos químicos	Período de exposição							
	0 horas				5800 horas			
	Fibra de vidro		Resina		Fibra de vidro		Resina	
	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia
SiO ₂	62,34	61,78	39,77	39,45	60,62	59,61	38,83	34,51
Ca	21,53	20,61	11,14	11,51	13,82	15,81	10,44	10,37
Al ₂ O ₃	14,00	15,08	11,36	11,38	17,65	16,90	11,83	12,53
C	0,00	0,00	33,05	32,71	3,28	3,66	34,50	38,13
Mg	1,67	1,99	1,73	2,06	3,30	3,04	2,27	2,08
Na	0,00	0,00	0,00	0,39	0,98	0,40	0,69	0,82
K	0,47	0,53	0,00	0,00	0,35	0,53	0,41	0,29
Cl	0,00	0,00	2,96	2,25	0,00	0,03	0,72	0,78
S	0,00	0,00	0,00	0,28	0,03	0,05	0,32	0,50

Quadro 3.24 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de calda de referência e submersas no ambiente alcalino

Moléculas e elementos químicos	Período de exposição							
	0 horas				5800 horas			
	Fibra de vidro		Resina		Fibra de vidro		Resina	
	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia
SiO ₂	62,34	61,78	39,77	39,45	60,46	59,74	40,98	29,47
Ca	21,53	20,61	11,14	11,51	15,00	15,29	10,97	8,62
Al ₂ O ₃	14,00	15,08	11,36	11,38	17,08	17,06	11,89	9,24
C	0,00	0,00	33,05	32,71	3,02	3,84	32,10	49,17
Mg	1,67	1,99	1,73	2,06	3,07	3,10	2,06	1,85
Na	0,00	0,00	0,00	0,39	0,89	0,41	0,53	0,36
K	0,47	0,53	0,00	0,00	0,39	0,50	0,36	0,60
Cl	0,00	0,00	2,96	2,25	0,03	0,00	1,10	0,37
S	0,00	0,00	0,00	0,28	0,06	0,06	0,04	0,34

Quadro 3.25 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de calda de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio

Moléculas e elementos químicos	Período de exposição							
	0 horas				5800 horas			
	Fibra de vidro		Fibra de vidro		Fibra de vidro		Resina	
	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia
SiO ₂	62,34	61,78	39,77	39,45	60,47	59,97	42,61	31,81
Ca	21,53	20,61	11,14	11,51	15,64	14,80	11,73	9,65
Al ₂ O ₃	14,00	15,08	11,36	11,38	16,90	17,09	12,44	10,04
C	0,00	0,00	33,05	32,71	2,73	3,59	28,77	43,92
Mg	1,67	1,99	1,73	2,06	3,03	3,09	2,25	1,95
Na	0,00	0,00	0,00	0,39	0,81	0,92	0,52	0,86
K	0,47	0,53	0,00	0,00	0,39	0,45	0,40	0,30
Cl	0,00	0,00	2,96	2,25	0,00	0,05	1,17	1,22
S	0,00	0,00	0,00	0,28	0,06	0,05	0,15	0,27

Quadro 3.26 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de betão de referência e submersas no ambiente salino

Moléculas e elementos químicos	Período de exposição							
	0 horas				5800 horas			
	Fibra de vidro		Resina		Fibra de vidro		Resina	
	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia
SiO ₂	62,34	61,78	39,77	39,45	59,34	61,27	36,94	40,01
Ca	21,53	20,61	11,14	11,51	13,43	13,52	8,93	11,08
Al ₂ O ₃	14,00	15,08	11,36	11,38	16,53	18,06	10,26	12,04
C	0,00	0,00	33,05	32,71	6,71	3,36	40,90	33,40
Mg	1,67	1,99	1,73	2,06	2,95	3,30	1,79	1,92
Na	0,00	0,00	0,00	0,39	0,79	0,00	0,40	0,80
K	0,47	0,53	0,00	0,00	0,22	0,50	0,29	0,33
Cl	0,00	0,00	2,96	2,25	0,00	0,00	0,46	0,24
S	0,00	0,00	0,00	0,28	0,05	0,00	0,03	0,26

Quadro 3.27 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de betão de referência e submersas no ambiente alcalino

Moléculas e elementos químicos	Período de exposição							
	0 horas				5800 horas			
	Fibra de vidro		Resina		Fibra de vidro		Resina	
	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia
SiO ₂	62,34	61,78	39,77	39,45	59,43	60,59	22,70	36,31
Ca	21,53	20,61	11,14	11,51	14,76	15,05	6,30	25,25
Al ₂ O ₃	14,00	15,08	11,36	11,38	17,01	17,44	7,37	9,76
C	0,00	0,00	33,05	32,71	4,43	2,54	58,26	21,85
Mg	1,67	1,99	1,73	2,06	3,08	3,19	1,28	1,65
Na	0,00	0,00	0,00	0,39	0,86	0,59	0,63	0,33
K	0,47	0,53	0,00	0,00	0,41	0,58	0,41	2,83
Cl	0,00	0,00	2,96	2,25	0,01	0,00	2,76	1,11
S	0,00	0,00	0,00	0,28	0,04	0,04	0,32	0,93

Quadro 3.28 – Concentração percentual das moléculas e dos elementos químicos constituintes das amostras de GFRP com recobrimento de betão de referência e submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio

Moléculas e elementos químicos	Período de exposição							
	0 horas				5800 horas			
	Fibra de vidro		Resina		Fibra de vidro		Resina	
	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia	Centro	Periferia
SiO ₂	62,34	61,78	39,77	39,45	60,62	59,61	38,83	34,51
Ca	21,53	20,61	11,14	11,51	13,82	15,81	10,44	10,37
Al ₂ O ₃	14,00	15,08	11,36	11,38	17,65	16,90	11,83	12,53
C	0,00	0,00	33,05	32,71	3,28	3,66	34,50	38,13
Mg	1,67	1,99	1,73	2,06	3,30	3,04	2,27	2,08
Na	0,00	0,00	0,00	0,39	0,98	0,40	0,69	0,82
K	0,47	0,53	0,00	0,00	0,35	0,53	0,41	0,29
Cl	0,00	0,00	2,96	2,25	0,00	0,03	0,72	0,78
S	0,00	0,00	0,00	0,28	0,03	0,05	0,32	0,50

3.4.1.6. Ensaio de calcinação

O ensaio de calcinação tem como principal objetivo eliminar materiais voláteis como os carbonatos e hidratos. O processo de calcinação consiste em submeter o material a temperaturas elevadas de maneira a remover uma fase volátil quimicamente ligada a um determinado sólido.

No âmbito do tema da dissertação, pretendeu-se volatilizar a resina do material compósito (varão de GFRP). O objetivo seria analisar a degradação da resina do varão de GFRP, degradação essa imposta pelos ambientes de exposição. Essa degradação é analisada através das pesagens antes e após calcinação de amostras do varão de GFRP. Através deste processo, é possível obter a percentagem de fibra de vidro e resina.

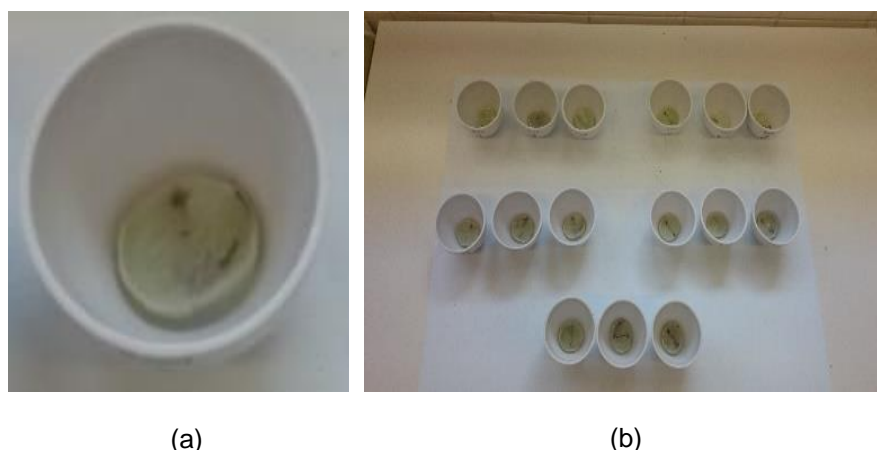
Este trabalho experimental foi realizado no laboratório do Departamento de Conservação e Restauro da FCT UNL, onde todo o equipamento utilizado foi disponibilizado pelo departamento. Foram utilizadas: uma câmara *Mermmet*, Figura 3.30 (a), onde se fez uma secagem das amostras para obtenção do peso seco; uma estufa *Nabertherm* onde ocorreu a calcinação das amostras, Figura 3.30 (b).



(a) Câmara *Mermmet*. (b) Estufa *Nabertherm*.

Figura 3.30 – Equipamentos utilizados no ensaio de calcinação

Foram preparadas amostras a partir dos varões de GFRP. A obtenção das amostras resultou de um corte transversal nos varões, como mostra a Figura 3.31. Nos provetes de calda e de betão, foram removidos os recobrimentos para alcançar os varões de GFRP que se encontravam embutidos. Na realização do ensaio, foram utilizados cadinhos que suportassem as altas temperaturas da estufa. Os cadinhos são os recipientes onde as amostras são colocadas. O Quadro 3.29 apresenta as amostras utilizadas no ensaio. Utilizou-se uma amostra para cada caso diferente.



(a) Amostra de varão de GFRP; (b) Conjunto de amostras de varão de GFRP.

Figura 3.31 – Amostras de GFRP para ensaio de calcinação

Quadro 3.29 – Amostras de varão de GFRP utilizadas no ensaio

Recobrimento	Ambiente de exposição	Período de exposição (horas)
Sem recobrimento	Referência	0
	Salino	4500
	Alcalino	
	Sulfatos e cloretos de sódio	
	Salino	8400
	Alcalino	
	Sulfatos e cloretos de sódio	
Recobrimento de calda	Salino	2500
	Alcalino	
	Sulfatos e cloretos de sódio	
	Salino	5800
	Alcalino	
	Sulfatos e cloretos de sódio	
Recobrimento de betão	Salino	2500
	Alcalino	
	Sulfatos e cloretos de sódio	
	Salino	5800
	Alcalino	
	Sulfatos e cloretos de sódio	

A execução do ensaio está em conformidade com a norma ISO 1172 [46]. Métodos de calcinação para determinação de fibras de vidro podem ser consultados na norma. A Figura 3.32 mostra procedimentos de ensaio. No Quadro 3.30 encontram-se os resultados obtidos da percentagem de fibra de vidro e resina.

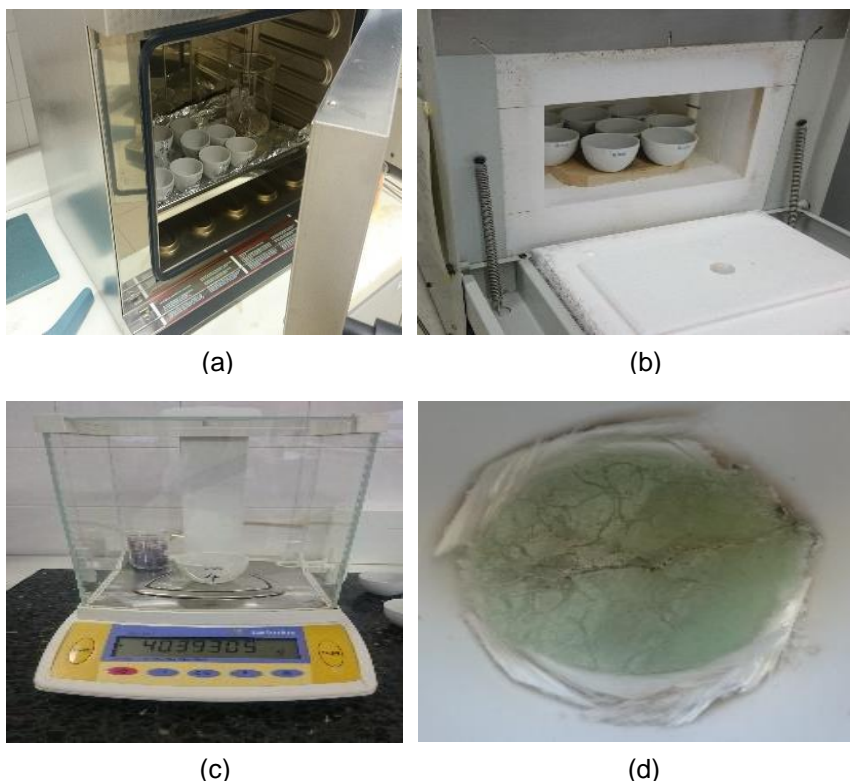


Figura 3.32 – Procedimentos de ensaio de calcinação

Quadro 3.30 – Percentagem de fibra de vidro e resina resultante de cada amostra de varão GFRP

Amostra	Ambiente de exposição	Período de exposição (horas)	Percentagem de fibra (%)	Percentagem de resina (%)
Sem recobrimento	Referência	0	71,39	28,61
	Salino	4500	71,14	28,86
	Alcalino		71,85	28,15
	Sulfatos e cloretos de sódio		71,70	28,30
	Salino	8400	72,05	27,95
	Alcalino		73,21	26,79
	Sulfatos e cloretos de sódio		71,41	28,59
Recobrimento de calda	Salino	2500	73,45	26,55
	Alcalino		74,61	25,39
	Sulfatos e cloretos de sódio		73,51	26,49
	Salino	5800	73,05	26,95
	Alcalino		74,47	25,53
	Sulfatos e cloretos de sódio		73,61	26,39
Recobrimento de betão	Salino	2500	72,27	27,73
	Alcalino		72,76	27,24
	Sulfatos e cloretos de sódio		73,84	26,16
	Salino	5800	72,79	27,21
	Alcalino		73,65	26,35
	Sulfatos e cloretos de sódio		74,08	25,92

3.4.2. Caracterização mecânica dos varões de GFRP

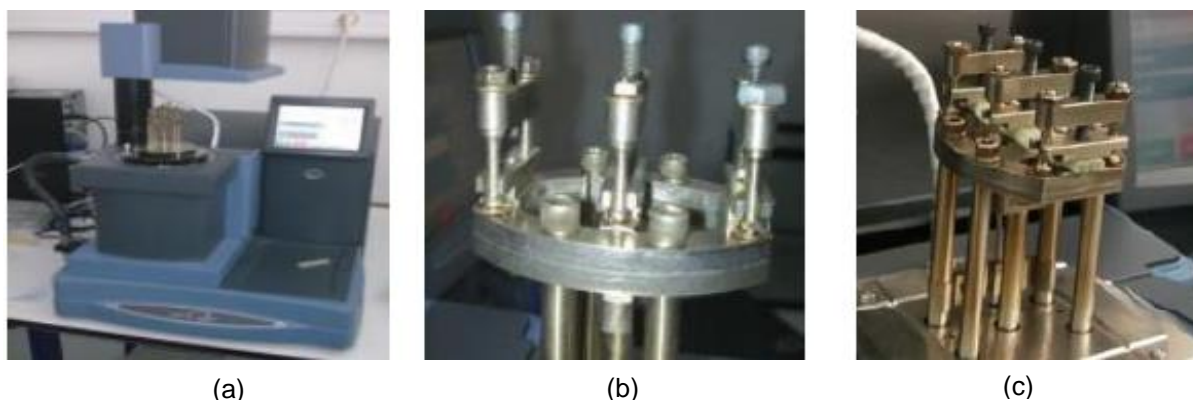
É efetuada uma abordagem dos ensaios mecânicos realizados no âmbito da presente dissertação, nomeadamente:

- Determinação de temperatura de transição vítrea através de análise mecânica dinâmica (DMA);
- Ensaios de tração dos varões de GFRP;
- Ensaios de impacto de tipo Charpy.

3.4.2.1. Ensaio para determinação de temperatura de transição vítrea através de análise mecânica dinâmica (DMA)

O aumento de teor de humidade em geral diminui a temperatura de transição vítrea, T_g , das resinas e as propriedades mecânicas dos compósitos. No âmbito do tema da presente dissertação, obteve-se a temperatura de transição vítrea da resina viniléster do varão de GFRP. A análise mecânica dinâmica, também conhecida como DMA é uma técnica onde pequenas deformações são aplicadas a uma amostra de forma cíclica. A técnica DMA funciona aplicando uma deformação sinusoidal a uma amostra encastrada de geometria conhecida. A amostra pode ser submetida a uma tensão controlada. Para uma tensão conhecida, a amostra irá então deformar. O quanto se deforma está relacionado com a sua rigidez. Um motor de força é usado para gerar a onda sinusoidal e isso é transmitido para a amostra através de um eixo de acionamento. A partir do ensaio é possível determinar a temperatura de transição vítrea do material. Na literatura de investigação existem artigos em torno da técnica [47].

Foi solicitado ao INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial que fizesse os ensaios de análise mecânica dinâmica (DMA), com o objetivo de determinar a temperatura de transição vítrea de várias amostras de varão de GFRP, por não ser possível usar o equipamento do DEC-FCT. O equipamento utilizado no ensaio o DMA foi TA Instruments modelo Q800, Figura 3.33. O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D 7028 [48]. Relativamente às condições de ensaio, foi realizada uma passagem com uma rampa de aquecimento de 30°C até 200°C, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min, uma frequência de 1 Hz e uma amplitude de oscilação de 10 μm .



a) Aparelho; b) Suporte de amostra; c) Amostra encastrada modo dual cantilever.

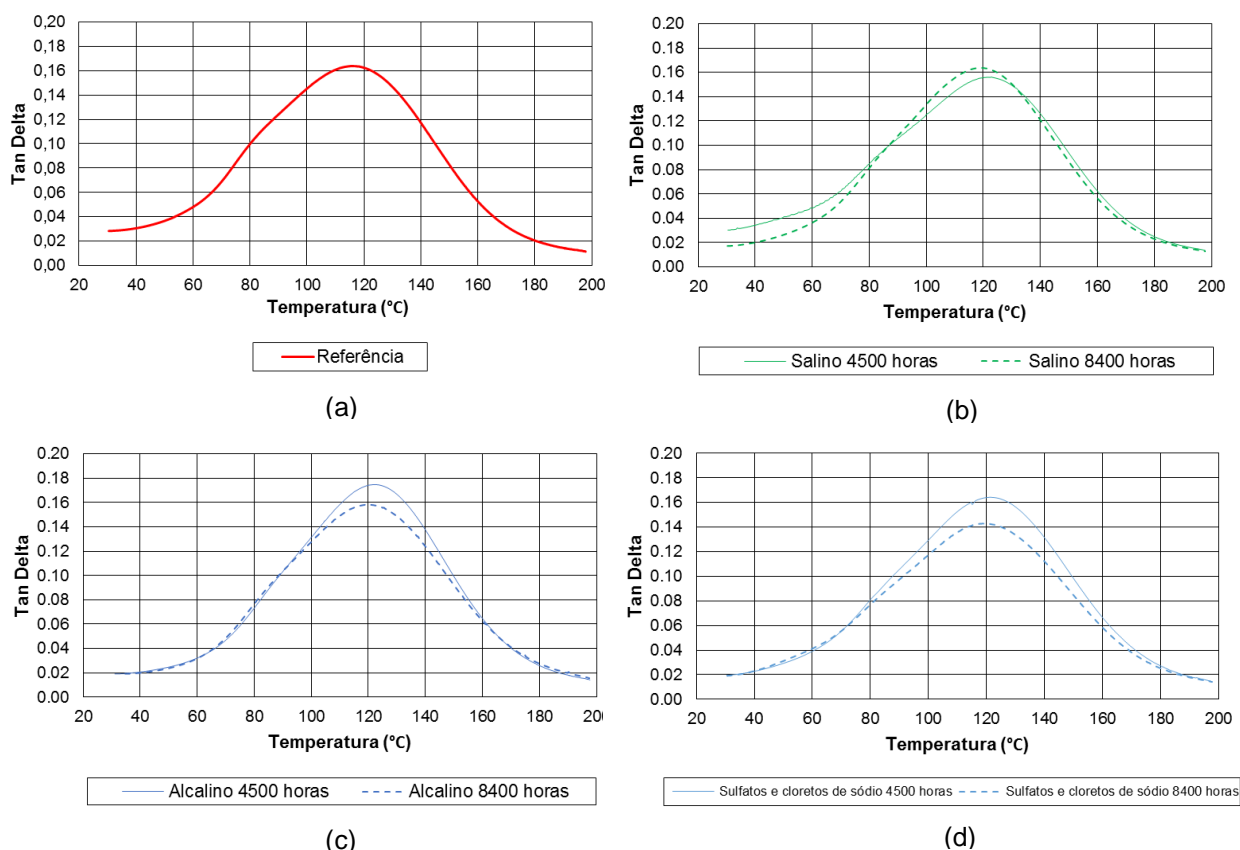
Figura 3.33 – Equipamento de ensaio de DMA (INEGI)

Seguindo a norma mencionada, foram ensaiadas diversas amostras, sem condicionamento prévio. A preparação das amostras consiste na execução de cortes do varão de GFRP com secção circular, de modo a obter um prisma retangular. Na Figura 3.34 encontra-se a amostra preparada.



Figura 3.34 – Amostra de varão de GFRP para ensaio DMA

A Figura 3.35 mostra os gráficos de Tan Delta em função da temperatura, obtidos no ensaio DMA. O pico dos gráficos representa a temperatura de transição vítrea da resina das amostras. Dimensões e respectivas temperaturas de transição vítrea de cada amostra encontram-se no Quadro 3.31.



(a) Referência; (b) Salino; (c) Alcalino; (d) Sulfatos e cloretos de sódio.

Figura 3.35 – Gráficos de Tan Delta em função da temperatura das amostras de varão de GFRP de referência e submersas nos ambientes de exposição

Quadro 3.31 – Resultados das amostras de varão de GFRP ensaiadas através da técnica DMA

Amostra	Ambiente de exposição	Período de exposição (horas)	Largura [mm]	Espessura [mm]	T _g [°C]
Varão de GFRP	Referência	0	9,66	3,77	115,7
	Salino	4500	9,50	3,97	122,7
		8400	9,84	3,77	119,4
	Alcalino	4500	9,45	3,83	122,2
		8400	9,43	3,93	119,9
	Sulfatos e cloretos de sódio	4500	9,45	3,89	121,4
		8400	8,74	3,49	119,5

3.4.2.2. Ensaios de tração dos varões de GFRP

O presente trabalho experimental consiste em ensaiar varões de GFRP a partir de: sistema porticado concebido através de material disponível no laboratório de estruturas do Departamento de Engenharia Civil; máquina de ensaio SERVOSIS.

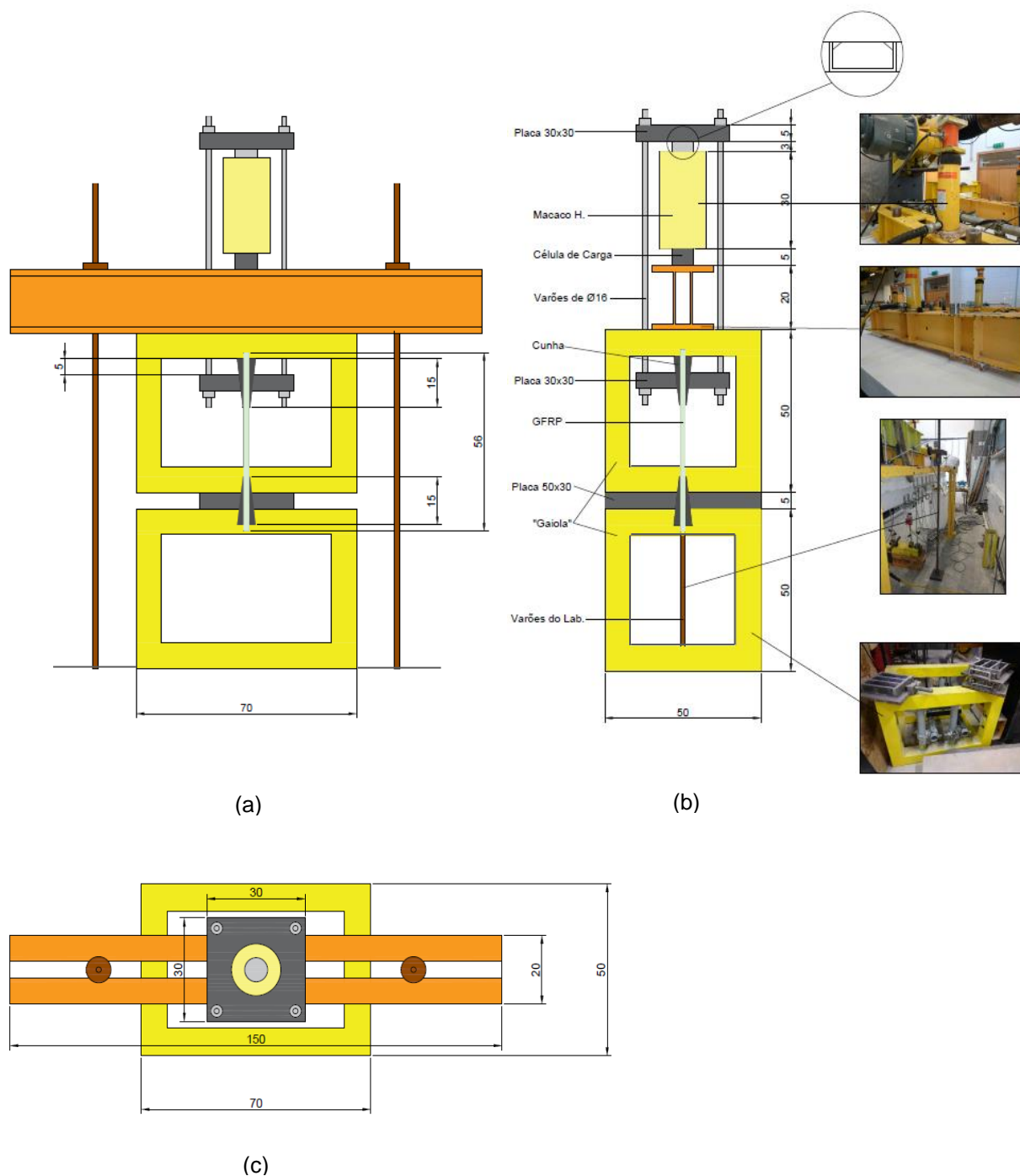
Sistema porticado

Os aparelhos presentes no laboratório de estruturas do DEC são limitados para o ensaio dos varões de GFRP de tração, devido às elevadas capacidades de resistência das fibras de vidro. Deste modo, verificou-se que era indispensável a criação do sistema porticado que pudesse exercer valores de força que outros aparelhos não alcançam. Foi realizada uma tentativa de conceber um sistema porticado que tivesse elevada capacidade de força para conduzir os varões à rotura.

Um dos objetivos da conceção deste sistema é o aproveitamento de elementos tridimensionais que servissem de estrutura para realizar o ensaio. Para o efeito, foi necessário recorrer ao dimensionamento de elementos que completassem o mecanismo. Devido a restrições financeiras, não foi possível prosseguir com a elaboração de um sistema porticado. No entanto, é referido o plano de montagem e dimensionamento dos elementos a fabricar.

A estrutura do sistema é constituída por uma gaiola de 70x50x50 cm, que serve de base de apoio para o mecanismo de tração, Figura 3.36. Este mecanismo é composto por uma placa com furo central de 50x30x5 cm e por uma cunha, local do sistema que servirá para fixar uma das extremidades do varão de GFRP. A segunda extremidade do varão é fixa a partir de uma placa de 30x30x5 cm com furo ao centro e com cunha. Optou-se por empregar as cunhas como acessório de aperto dos varões, uma vez que não haverá deslizamento entre a ligação placa/cunha. Esta segunda placa encontra-se interligada com uma terceira, com dimensões 30x30x5 cm, a partir de quatro varões enroscados de 16 mm de diâmetro e respetivas porcas. O macaco hidráulico é introduzido no sistema porticado entre a terceira placa e um suporte estrutural constituído por uma viga e por uma outra gaiola com as dimensões da

gaiola da base. A célula de carga é colocada por baixo do macaco hidráulico para medir a força aplicada nos varões.



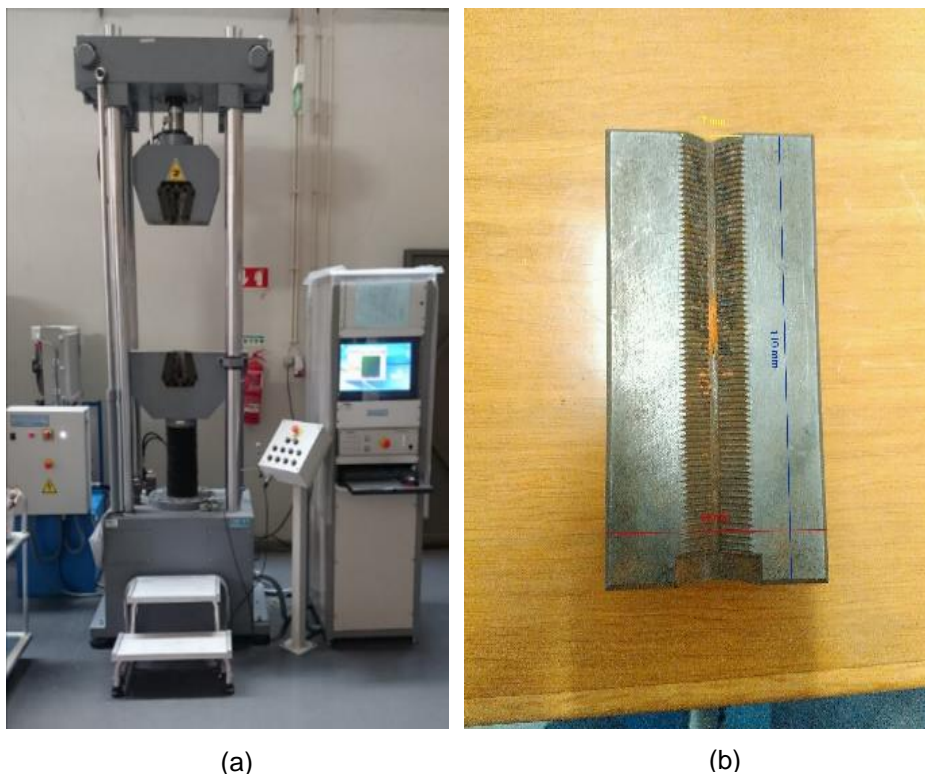
(a) Corte longitudinal; (b) Corte transversal; (c) Planta.

Figura 3.36 – Sistema porticado e seus componentes

Para se poder ensaiar o varão à tração, foi necessário dimensionar placas e cunhas para concluir o sistema porticado. No Anexo H, encontram-se os elementos dimensionados, cujo orçamento de fabrico iria para além das verbas disponíveis, ficando suspensa a campanha experimental deste ensaio.

Máquina de ensaio

A alternativa ao sistema porticado para realizar os ensaios de tração nos varões de GFRP seria recorrer ao equipamento disponível na Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal. No laboratório de materiais de construção, encontra-se o equipamento SERVOSIS modelo MUE 404/60 que permite ensaiar corpos de prova à tração, com uma capacidade de 100 toneladas, Figura 3.37 (a). As garras do sistema possuem um comprimento de amarração de 11 cm, Figura 3.37 (b).



(a) Máquina de ensaio de tração; (b) Garras de aperto.

Figura 3.37 – Equipamento SERVOSIS MUE 404/60 (ISP/ESTB)

Este tipo de ensaios de tração com varões de GFRP está em conformidade com o código ACI 440.3R [31]. O desafio desta campanha experimental é ensaiar varões de GFRP entre os 40 e 55 cm, de forma a obter rotura do material. A preparação dos corpos de prova consiste na proteção das extremidades dos varões de GFRP com tubos de aço, impedindo o esmagamento das fibras causado pelas garras da máquina. A interligação do tubo de aço com o varão de GFRP é feita a partir da resina *S&P Resin 55*. Ao longo de várias tentativas, alterações na preparação dos corpos de prova foram feitas para alcançar a falha do material. Nas Figuras 3.38 a 3.40 e Quadro 3.32 estão apresentadas as configurações dos corpos de prova ao longo desta campanha.

Quadro 3.32 – Configurações utilizadas nos varões de GFRP

Corpo de prova	Comprimento (cm)										Malha de reforço GFRP nas extremidades	Junta entre meias canas (5 mm)	Entalhe nas extremidades (1 mm)	Resina	
	Varão			Meias canas de aço					Abraçadeiras de aperto					Lab. DEC	S&P Clever Reinforcement Iberica Lda
	40	50	55	10	15	20	22,5	23	5	8					
T1	X														
T2	X			X										X	
T3	X			X							X	X		X	
T4	X				X							X		X	
T5	X				X				X			X		X	
T6			X				X		X			X		X	
T7		X				X			X			X		X	
T8	X					X			X			X		X	
T9		X						X		X		X		X	
T10		X						X		X		X	X		X

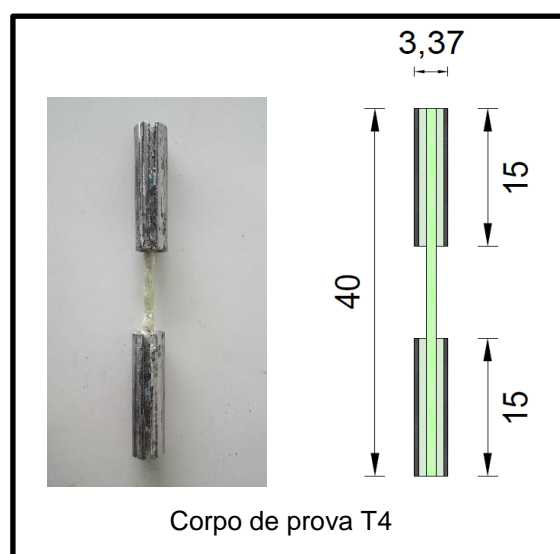
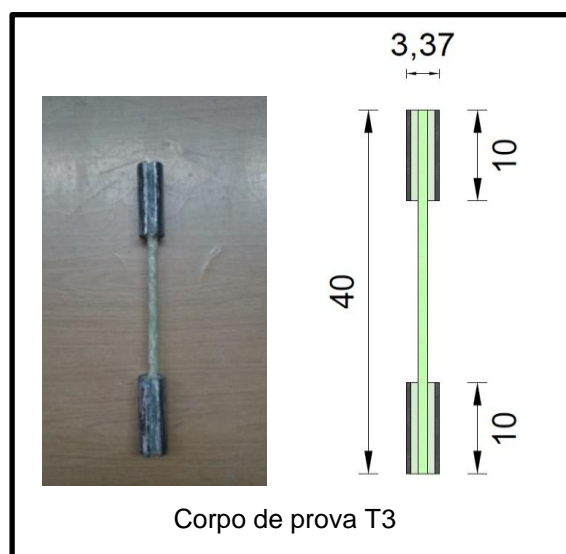
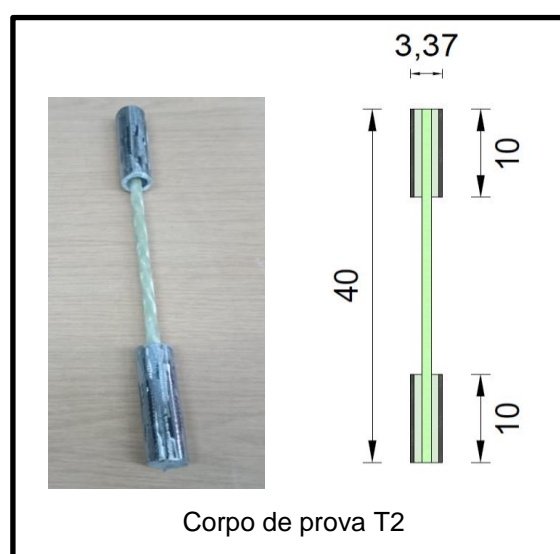
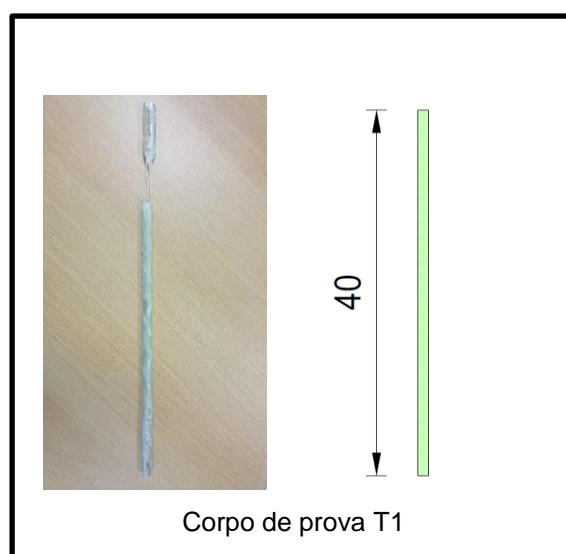
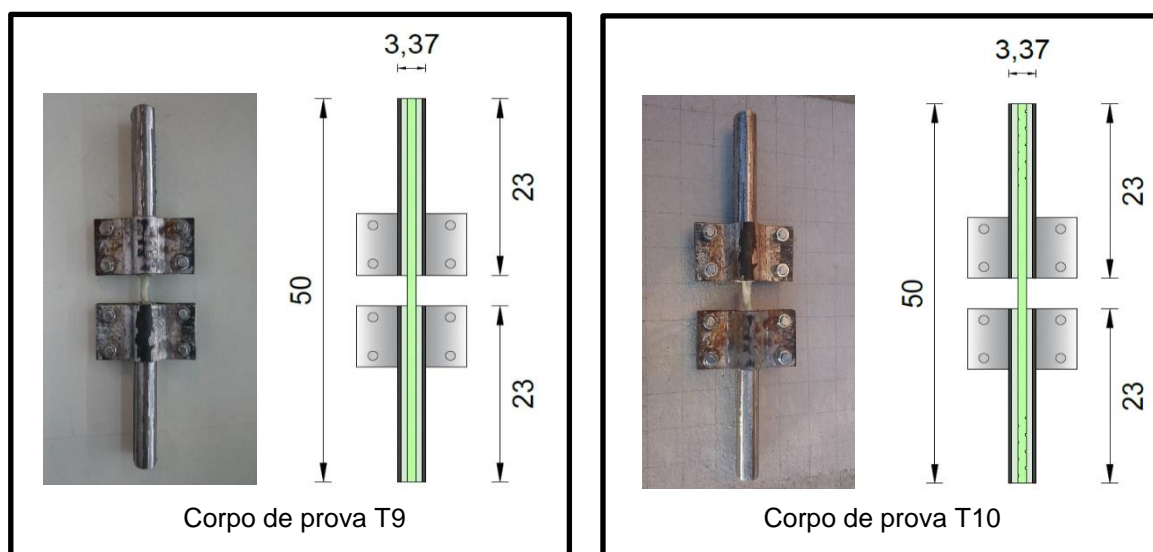
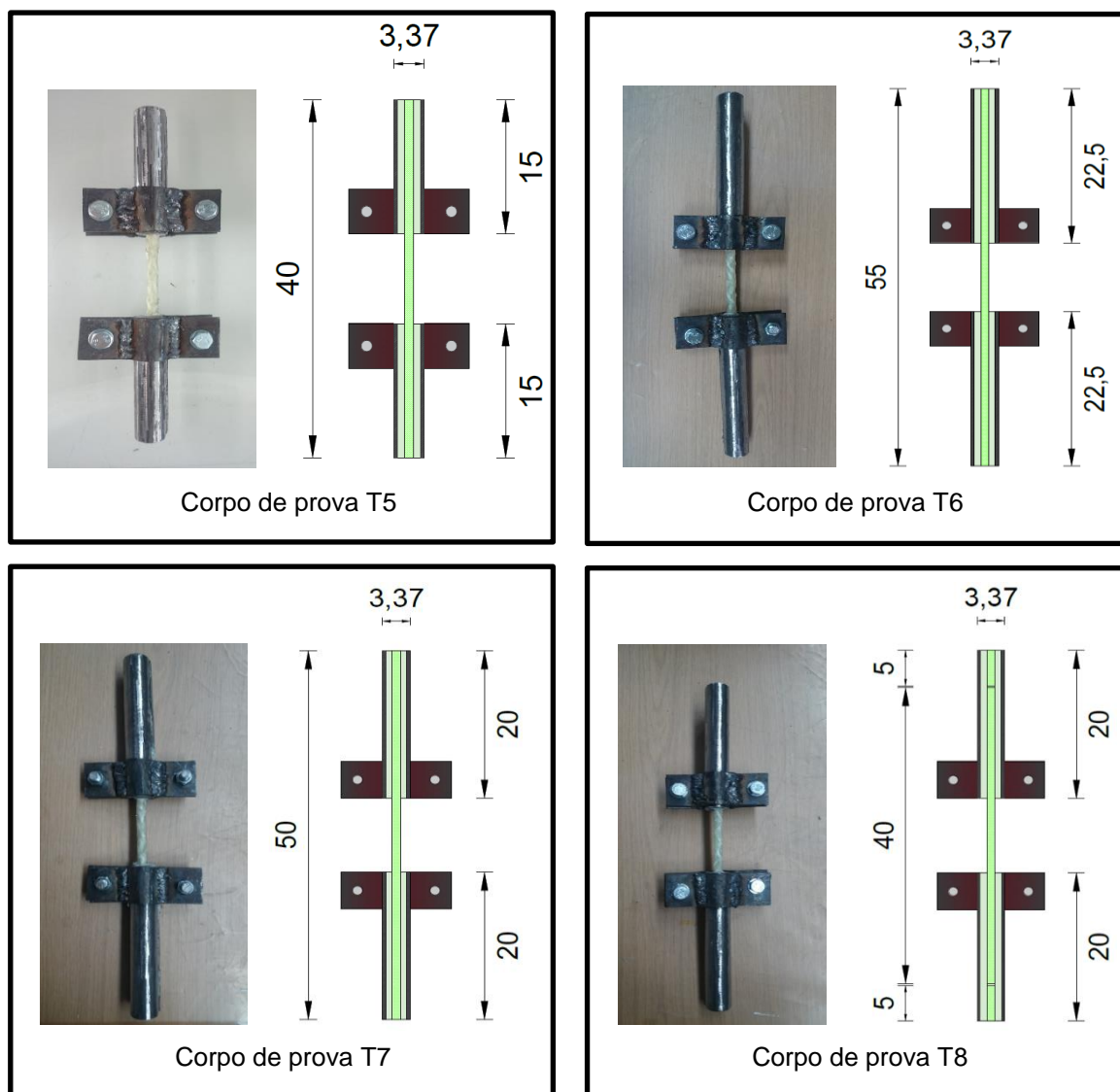


Figura 3.38 – Corpos de prova para ensaio de tração sem abraçadeiras de aperto



Na realização dos ensaios, nenhum dos corpos de prova foi levado à rotura, devido à ocorrência da rotura por aderência entre os materiais resina/varão de GFRP.

Foram obtidos gráficos de tensão/deformação dos varões e através dos gráficos foram calculados os módulos de elasticidade. Os valores do módulo de elasticidade de cada varão encontram-se abaixo, na Figura 3.41, bem como os gráficos tensão deformação na Figura 3.42. Cada cor corresponde a um tipo de corpo de prova.

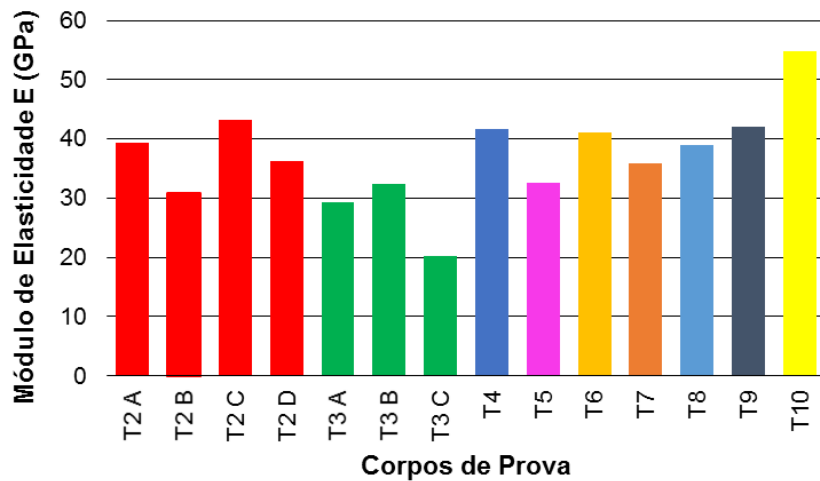


Figura 3.41 – Módulos de elasticidade dos varões de GFRP ensaiados

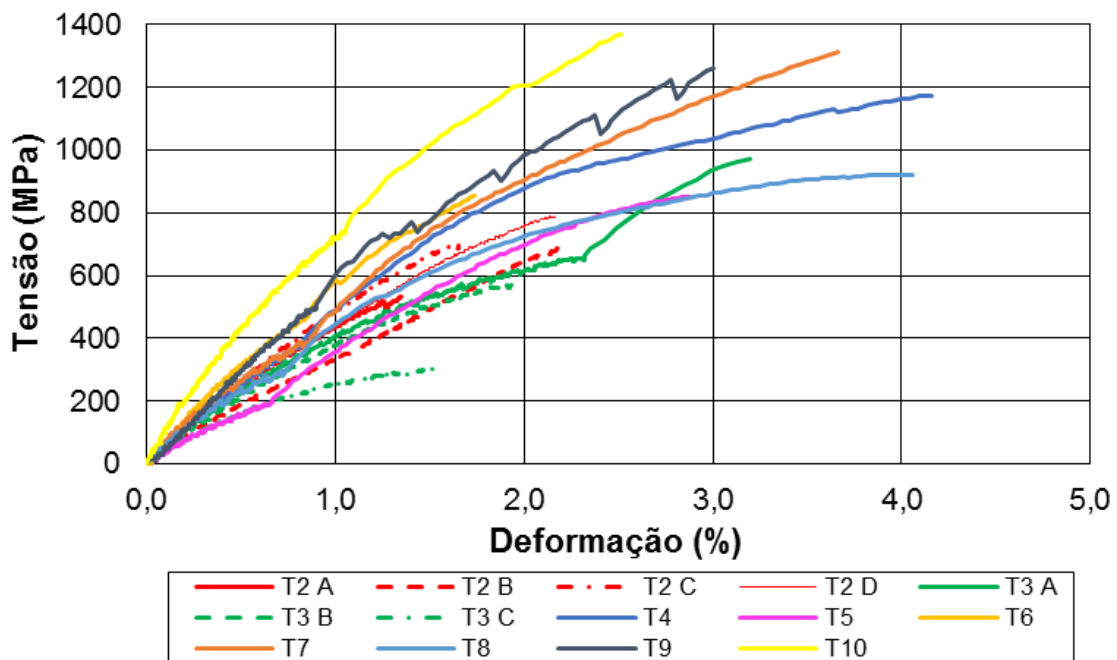


Figura 3.42 – Curvas de tensão/deformação dos corpos de prova ensaiados

3.4.2.3. Ensaio de impacto de tipo Charpy

O ensaio de impacto de tipo Charpy é, fundamentalmente, um ensaio de flexão de três pontos em que a carga é aplicada através de um pêndulo de modo a causar efeitos dinâmicos, como se descreve abaixo. Este tipo de ensaio está normalizado para aplicações em engenharia podendo consultar-se, por exemplo, a norma ASTM D 6110 [49], ou ISO 179 [50].

No presente estudo, a secção dos varões, sendo circular, não permite aplicação direta daquelas normas. Também não se encontraram ensaios normalizados para esse tipo de secção, pelo que se optou por uma execução de amostras que permitisse ensaios análogos e comparação de resultados e que usasse os conceitos de energia residual do corpo impactante após o choque contra os provetes.

Na literatura de investigação recente encontraram-se numerosos artigos em torno desta técnica, especialmente para materiais metálicos [51], incluindo trabalhos com FRP [52,53]. Relevante para este tópico e incluindo efeitos de envelhecimento antecipa-se o artigo [54].

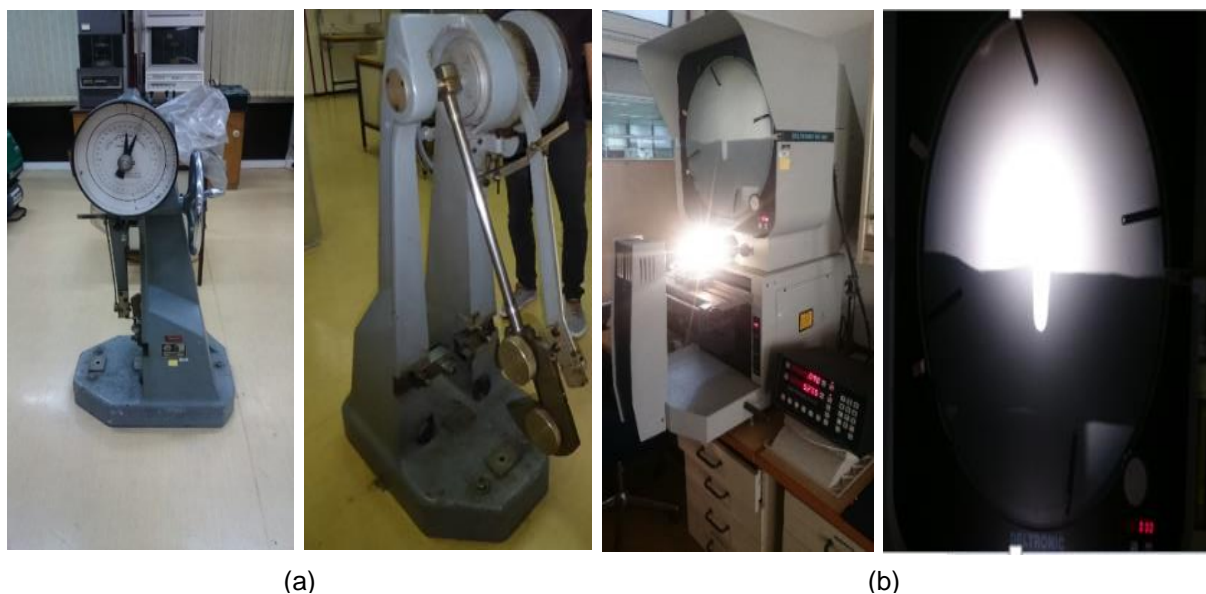
O equipamento que transmite a força dinâmica é essencialmente constituído por um pêndulo de massa e comprimento dado que é deixado cair de uma altura conhecida. A energia absorvida pelo material durante o impacto pode ser calculada e o ensaio fornece um modo rápido e prático de se avaliar qualitativamente a capacidade de um material absorver energia. Também permite conhecer os modos de falha dos provetes de fibra de vidro submetidos a carregamento dinâmico.

O pêndulo e massas disponíveis no Departamento de Engenharia e Ciências dos Materiais da FCT UNL, TINIUS OLSEN Modelo - IT 503 não geravam energia suficiente para a rotura dos varões de 10 mm de diâmetro de GFRP, Figura 3.43.



Figura 3.43 – Pêndulo TINIUS OLSEN Modelo - IT 503

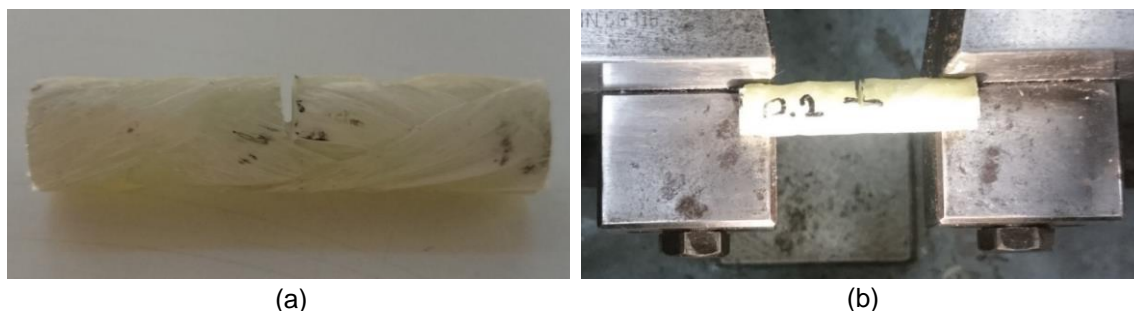
Deste modo, recorreu-se ao LNEG, onde foi autorizado o uso sem contrapartidas do pêndulo Wolpert de 300 J, Figura 3.44 (a). A ficha de utilização do equipamento encontra-se no Anexo I.



(a) Pêndulo Wolpert; (b) Sistema Deltronic DH 400
Figura 3.44 – Equipamentos utilizados no ensaio de impacto (LNEG)

Amostras de GFRP com diâmetro de 10 mm foram ensaiadas comparando a capacidade de absorver energia das amostras não condicionadas com as condicionadas em ambientes agressivos. Na realidade, os varões possuem em média 11,95 mm de diâmetro devido ao enrolamento em espiral que aumenta a rugosidade da superfície. As amostras envelhecidas de GFRP foram submetidas a imersão em água salgada, solução alcalina e solução de sulfatos e cloretos de sódio, já descritas, por um período de contaminação de 5300 horas.

As amostras foram preparadas segundo a norma ASTM E23 [55] com 55 mm de comprimento e um entalhe com uma média de 6,58 mm de profundidade a meio vão, espessura média de 1,22 mm e um raio de curvatura de 0,56 mm para assegurar a falha da amostra, Figura 3.45 (a). A distância entre apoios, onde a amostra é colocada, é de 40 mm, Figura 3.45 (b). Realizou-se uma leitura das dimensões do entalhe das amostras. Foi também medido o comprimento da secção resistente. Esta secção resistente é a secção onde se encontra o entalhe, sendo feita a medição do comprimento sobrance da secção. É também a secção onde o pêndulo incidirá no impacto. Estas medições foram realizadas a partir do aparelho Deltronic DH 400, que ocupa as instalações no LNEG, Figura 3.44 (b).



(a) Amostra de GFRP com entalhe; (b) Colocação da amostra de GFRP entre os apoios do pêndulo.

Figura 3.45 – Amostra de GFRP utilizada no ensaio de impacto

Os resultados obtidos no ensaio resumem-se no Quadro 3.33. Os modos de rotura das amostras de GFRP apresentam-se na Figura 3.46.

Quadro 3.33 – Resultados obtidos no ensaio de impacto tipo Charpy

Ambiente de exposição	Amostra	Secção Resistente	Entalhe		GFRP	Energia (J)	Média (J)	Perda de energia (%)
		Comprimento (mm)	Raio Curvatura (mm)	Esp. (mm)	Ø (mm)			
Referência	0.1	7,477	0,789	1,456	12,025	30,87	31,75	-
	0.2	6,667	0,559	1,247	12,165	31,36		
	0.3	6,761	0,503	1,190	12,225	28,91		
	0.4	6,642	0,544	1,250	12,250	24,50		
	0.5	7,245	0,511	1,166	11,785	35,28		
	0.6	5,744	0,512	1,251	11,755	24,50		
	0.7	7,185	0,437	1,107	11,735	44,59		
	0.8	6,551	0,490	1,320	11,795	31,36		
	0.9	5,953	0,520	1,219	12,120	34,30		
Salino	1.1	6,735	0,565	1,217	11,635	20,09	22,44	29,16
	1.2	7,271	0,514	1,135	12,180	17,64		
	1.3	6,775	0,471	1,311	11,785	23,52		
	1.4	6,500	0,617	1,246	11,870	30,38		
	1.5	6,831	0,575	1,269	11,735	22,54		
	1.6	6,071	0,513	1,221	12,025	16,66		
	1.7	6,371	0,571	1,091	11,415	23,03		
	1.8	6,229	0,590	1,251	11,905	24,99		
	1.9	6,562	0,464	1,123	11,930	23,52		
Alcalino	2.1	7,777	0,684	1,405	11,890	11,76	14,11	55,57
	2.2	6,577	0,654	1,337	11,745	11,76		
	2.3	5,586	0,562	1,331	11,665	10,29		
	2.4	6,467	0,568	1,280	12,385	13,72		
	2.5	6,921	0,671	1,341	12,305	17,15		
	2.6	6,725	0,516	1,255	11,930	10,78		
	2.7	7,150	0,724	1,382	11,755	15,68		
	2.8	7,317	0,548	1,180	12,190	20,09		
	2.9	6,556	0,594	1,205	12,260	15,68		
Sulfatos e cloretos de sódio	3.1	6,849	0,586	1,213	12,005	33,32	27,34	13,72
	3.2	6,374	0,562	1,229	11,990	31,36		
	3.3	6,664	0,573	1,097	11,805	25,48		
	3.4	5,496	0,557	1,044	11,815	23,03		
	3.5	6,394	0,587	1,180	12,120	31,36		
	3.6	6,398	0,526	1,174	11,765	21,07		
	3.7	5,173	0,469	1,102	12,080	23,52		
	3.8	6,063	0,589	1,107	11,870	33,32		
	3.9	6,769	0,499	1,125	12,205	24,01		



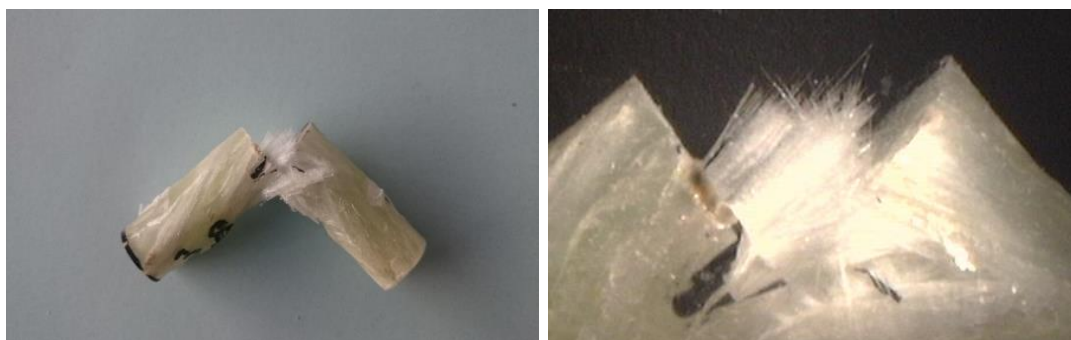
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Referência (b) Salino; (c) Alcalino; (d) Sulfatos e cloretos de sódio.

Figura 3.46 – Modos de rotura das amostras de GFRP de referência e submersas 5300 horas nos ambientes de exposição

Capítulo 4

Discussão de resultados

4.1. Considerações iniciais

No presente capítulo é realizada a discussão de resultados de caracterização física e mecânica dos varões de GFRP e caracterização física da calda e do betão.

Na caracterização física, é feita uma análise aos resultados obtidos na difusão molecular das soluções nos varões de GFRP sem e com recobrimento. Para a calda e para o betão também é realizada uma análise de resultados dos ensaios de espectrometria de fluorescência de raios X, determinação de porosidade aberta, massa volúmica aparente e porosimetria de mercúrio. Na caracterização física dos varões de GFRP são discutidos também os resultados obtidos nos ensaios de SEM e calcinação.

Por fim apresenta-se a discussão dos resultados de caracterização mecânica dos varões de GFRP que inclui a avaliação de propriedades mecânicas, incluído resistência à tração e ao impacto dos varões de GFRP.

Faz-se uma análise comparativa dos resultados obtidos, considerando também resultados obtidos noutros estudos.

4.2. Caracterização física dos varões de GFRP, calda e betão

4.2.1. Difusão molecular das soluções nas amostras

Através dos gráficos de ganho de massa em função do tempo de exposição aos ambientes agressivos dos varões de GFRP com e sem recobrimento, Figuras 4.1 e 4.2, pode-se verificar elevada capacidade de absorção dos varões de GFRP e provetes no período inicial de exposição. Após o período de maior absorção, observa-se um patamar horizontal, correspondendo à saturação dos materiais. Desta forma, considera-se que a evolução da massa em função do tempo de exposição dos varões de GFRP e dos provetes de calda e de betão apresenta um comportamento Fickiano, como observado no estudo [24].

Nos três ambientes de exposição, os varões de GFRP de Ø10 mm sem recobrimento, tiveram um maior ganho de massa percentual em relação aos de Ø16 e Ø25 mm. Para esta constatação, pressupõe-se a existência de uma taxa de penetração do soluto igual em todos os varões de diâmetro diferente, conduzindo a que varões com menor área de secção possuam uma evolução relativa de massa em função do tempo maior do que varões com maior área de secção.

Pode-se verificar um maior ganho de massa dos varões de GFRP sem recobrimento no ambiente alcalino e menores valores de ganho de massa no ambiente salino e no de sulfatos e cloretos de sódio. No ambiente alcalino observa-se um decréscimo de massa acentuado ao longo do envelhecimento dos varões de Ø10, a partir das 2500 horas, Figura 4.1 (a). Conjetura-se uma eventual lixiviação de material dos varões de GFRP, nomeadamente perda de resina deteriorada pelos hidróxidos provenientes do ambiente alcalino. A remoção de material origina vazios nos varões e permite uma maior absorção de soluto por parte dos varões de GFRP.

Na Figura 4.1 (a), no ambiente alcalino observa-se um ganho de massa dos varões de Ø10 após 2500 horas de exposição de aproximadamente 1,8%, semelhante aos resultados obtidos em [24], enquanto no ambiente salino e de sulfatos e cloretos de sódio o ganho de massa é cerca de 1,2 e 1,4% respetivamente. Nos varões de Ø25, o ganho de massa é superior no ambiente alcalino, com um valor de 0,9%. Em relação ao ambiente salino e de sulfatos e cloretos de sódio, o ganho de massa obtido é entre 0,6 a 0,7%, Figura 4.1 (b).

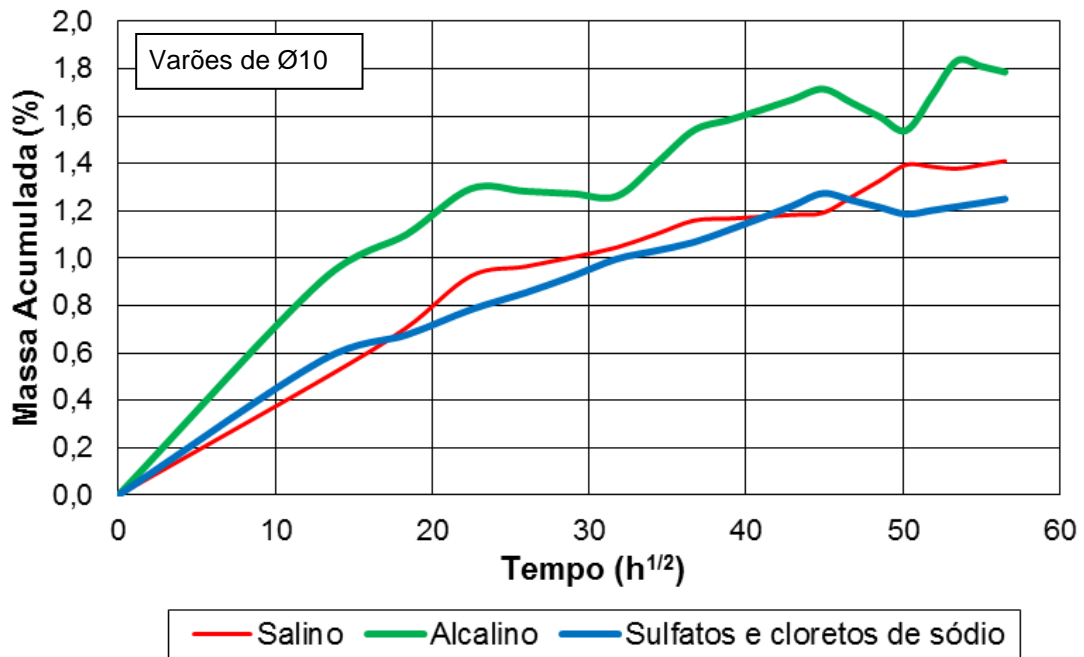
Admite-se que os iões do ambiente alcalino possuem menor dimensão (massa) do que os ambientes salino e sulfatos e cloretos de sódio, permitindo uma maior facilidade de se mover e penetrar os varões de GFRP.

Nos provetes de calda e betão, Figura 4.2, pode-se observar também um comportamento Fickiano, mostrando um rápido crescimento inicial, que abranda e se aproxima da saturação, ao longo do tempo.

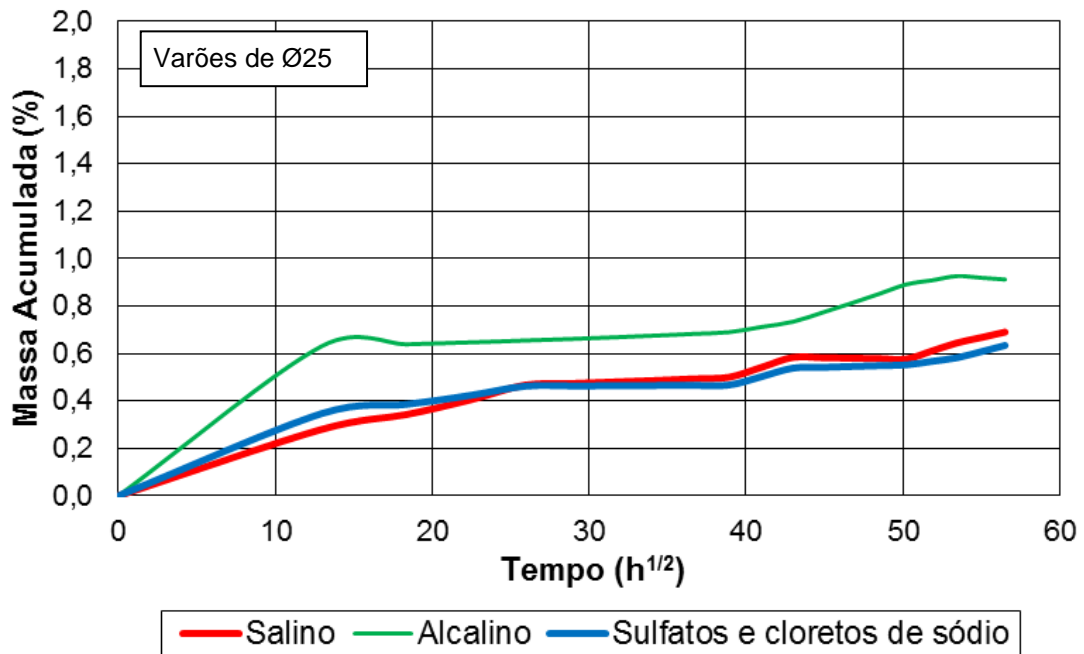
Nos provetes de calda verifica-se um maior ganho de massa no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio, que chegou a 6,5%, Figura 4.2 (a). No ambiente salino e alcalino, o ganho máximo de massa é de 3% a longo período de exposição.

Os provetes de betão mostraram ganhos de massa semelhantes nos três ambientes de exposição, Figura 4.2 (b). No ambiente salino e no de sulfatos e cloretos o ganho de massa atingiu os 4% aproximadamente enquanto no ambiente alcalino a evolução da massa alcançou os 3% após 2500 horas de exposição.

Através dos resultados obtidos do coeficiente de difusão, pode-se concluir que a difusividade é então independente do diâmetro dos varões e da concentração do contaminante para a maioria dos materiais de GFRP, e assume a validade das suposições da lei de Fick. Valores mais elevados para diâmetros menores correspondem a menor volume associado a igual penetração, sendo a difusividade independente do diâmetro.



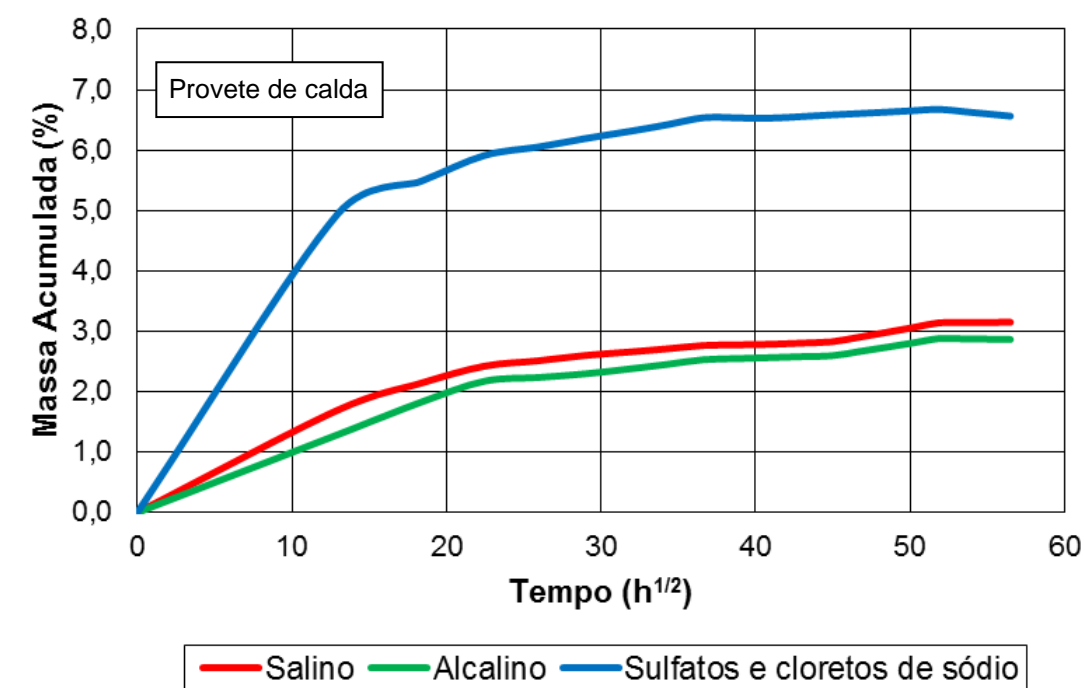
(a)



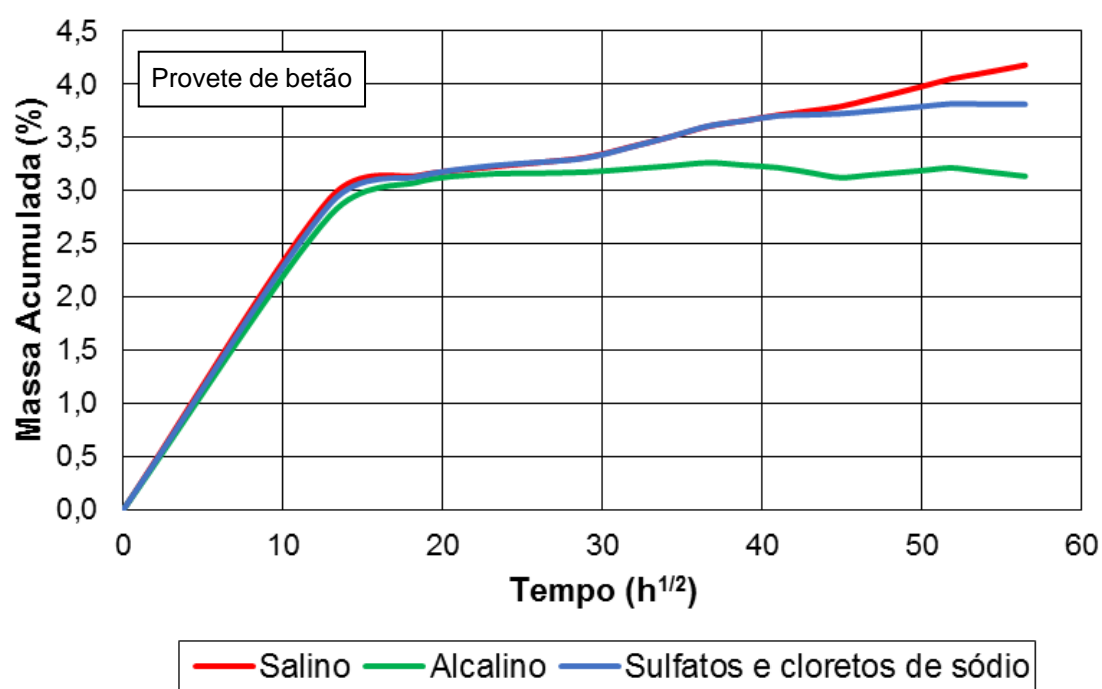
(b)

(a) Varões de Ø10; (b) Varões de Ø25

Figura 4.1 – Gráficos de ganho de massa ao longo do tempo de varões de GFRP nos diferentes ambientes



(a)



(b)

(a) Provetes de calda; (b) Provetes de betão

Figura 4.2 – Gráficos de ganho de massa ao longo do tempo de varões de GFRP de Ø25 protegidos com calda ou betão

4.2.2. Ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

Os resultados obtidos evidenciam que existe pouca alteração na concentração dos elementos químicos detetados nas amostras de calda e de betão ao longo da contaminação, em relação à amostra de referência.

A calda, geralmente composta por silicatos de cálcio ((CaO)SiO₂), aluminatos de cálcio ((CaO)Al₂O₃) e alguma percentagem de sulfatos de cálcio (CaSO₄), sofreu alguma alteração na concentração de elementos químicos devido à exposição aos três ambientes de estudo.

Na amostra de calda submersa em ambiente salino, é possível observar um aumento da concentração de iões cloreto Cl⁻, provenientes da solução que penetraram a amostra. Como seria de esperar, as amostras recolhidas a 1 cm da periferia possuem uma maior concentração de iões Cl⁻ do que a 2 cm. Num período de exposição maior, a concentração de cloretos aumentou, como se pode observar na Figura 4.3.

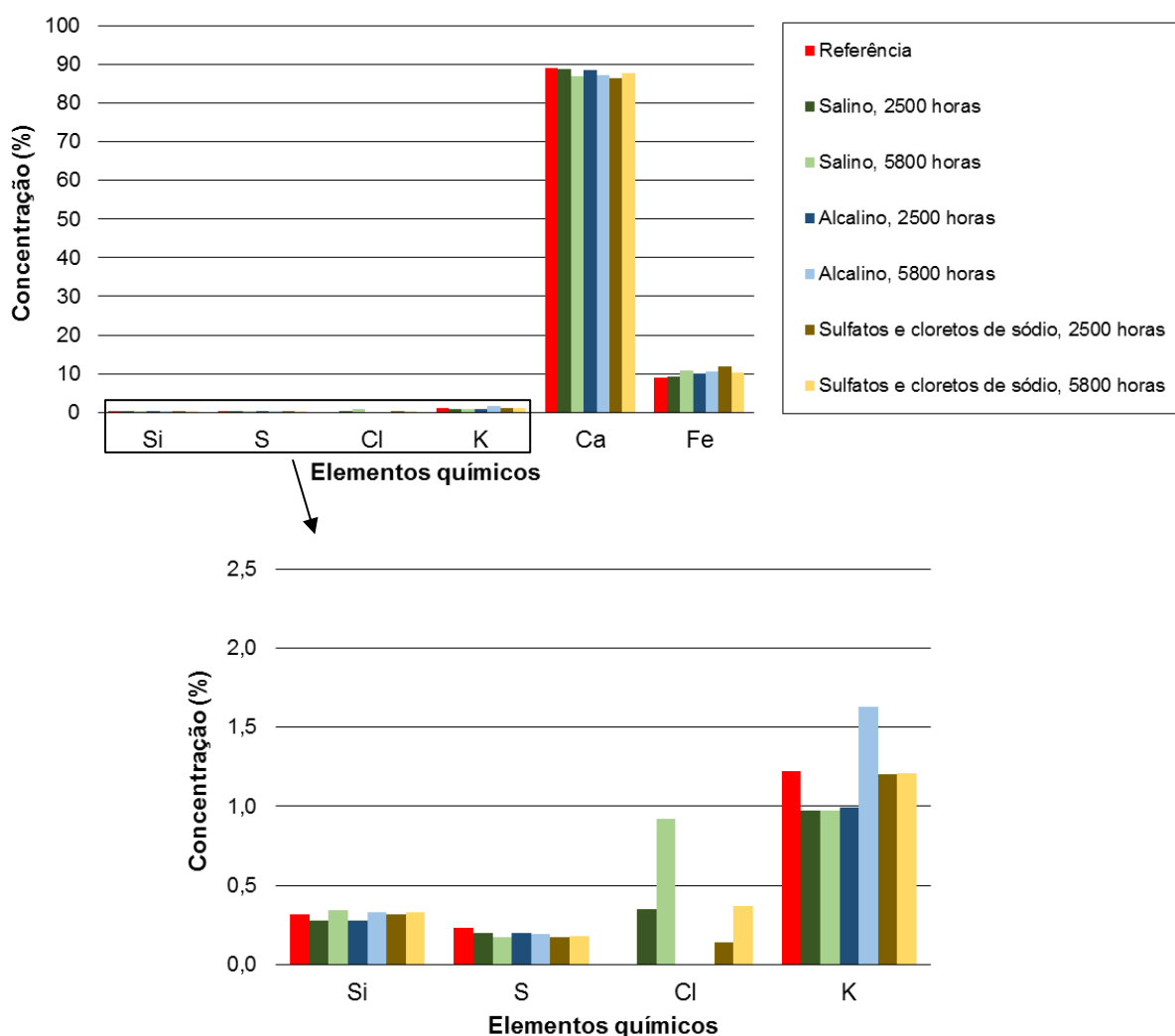


Figura 4.3 – Concentração dos elementos químicos no recobrimento de calda, L = 1 cm

O ambiente alcalino pouco alterou as concentrações da maior parte dos elementos químicos na amostra de calda. Destaca-se o aumento da concentração do potássio na calda quando em contacto com a solução alcalina, Figura 4.3. Pode-se verificar um aumento da concentração de iões de cloreto na amostra submersa na solução de sulfatos e cloretos de sódio, como tinha ocorrido na amostra sujeita ao ambiente salino, Figura 4.3.

Relativamente ao cálcio Ca^{+} , o gráfico indica uma ligeira diminuição da sua concentração principalmente ao fim de mais horas de contacto nas soluções salina e alcalina, eventualmente devido à dissolução do cálcio da cal na presença de iões Cl^{-} e OH^{-} das respetivas soluções.

No betão, a composição química é constituída essencialmente por silicato tricálcico $((\text{CaO})_3\text{SiO}_2)$, silicato dicálcico $((\text{CaO})_2\text{SiO}_2)$, aluminato tricálcico $((\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3)$, ferroaluminato tetracálcio $((\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3)$, silicatos (SiO_2) e carbonato de cálcio (CaCO_3) , podendo-se observar alguma penetração de iões provenientes das soluções na Figura 4.4.

No ambiente salino, em semelhança à amostra de calda, a amostra de betão apresenta um aumento de concentração dos iões de cloreto, como se pode verificar na Figura 4.4.

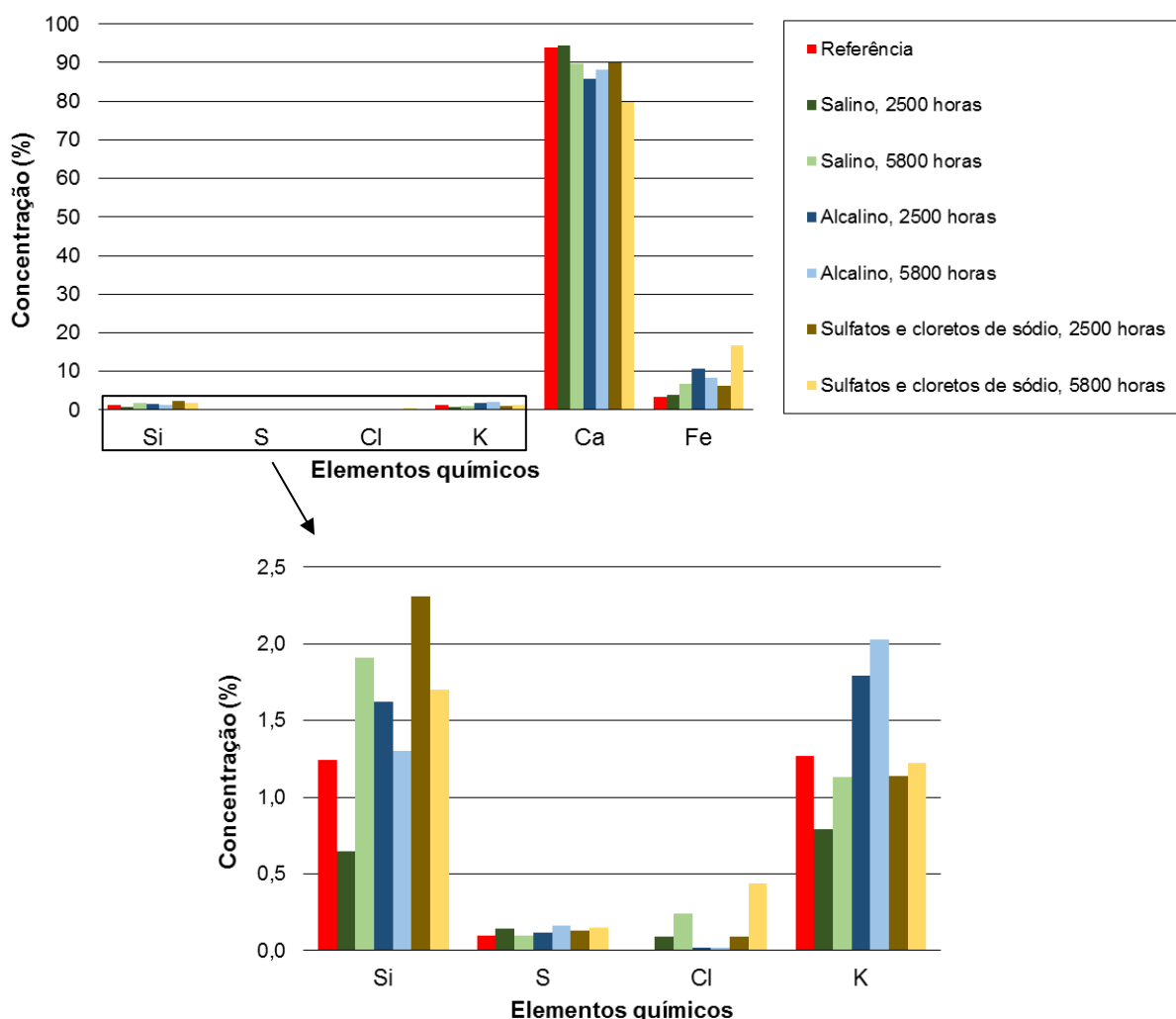


Figura 4.4 – Concentração dos elementos químicos no recobrimento de betão, L = 1cm

No ambiente alcalino, é detectado um ligeiro aumento da concentração dos íons potássio no betão. Existe presença de íons cloretos à medida que o período de exposição aumenta nas amostras de betão expostas à solução de sulfatos e cloretos de sódio. Constata-se que existe uma discrepância entre as concentrações de alguns elementos químicos detectados nas amostras de betão contaminadas, como por exemplo no caso do Si. Esta ocorrência é devida ao tipo de amostragem analisada durante o ensaio, pois o betão é um material heterogéneo e as amostras recolhidas podem ter agregados de composições muito diferentes.

4.2.3. Ensaio de determinação de massa volúmica aparente e porosidade aberta

É possível verificar um decréscimo na porosidade aberta nas amostras de calda e de betão quando expostas aos ambientes agressivos em relação à amostra de referência.

As amostras de calda submersas em ambiente salino demonstram diminuição de porosidade aberta ao longo do período de exposição. A massa volúmica aparente também diminui às 2500 horas e às 5800 horas. No ambiente alcalino, a massa volúmica aparente da amostra de calda é pouco alterada. À medida que a amostra é contaminada, a massa volúmica aparente aumenta e a porosidade aberta diminui. O valor da massa volúmica aparente da amostra de calda submetida ao ambiente composto por sulfatos e cloretos é superior à das amostras sujeitas aos outros ambientes ao fim de 5800 horas. A porosidade aberta também foi a que diminuiu mais. A razão pode estar relacionada com uma maior taxa de penetração do soluto do ambiente de sulfatos e cloretos de sódio observada na amostra de calda.

Nas amostras de betão, os resultados são semelhantes aos de calda. Existe proporcionalidade inversa entre a massa volúmica aparente e porosidade aberta, isto é, ao longo do período de exposição a massa volúmica aparente aumenta e a porosidade aberta diminui.

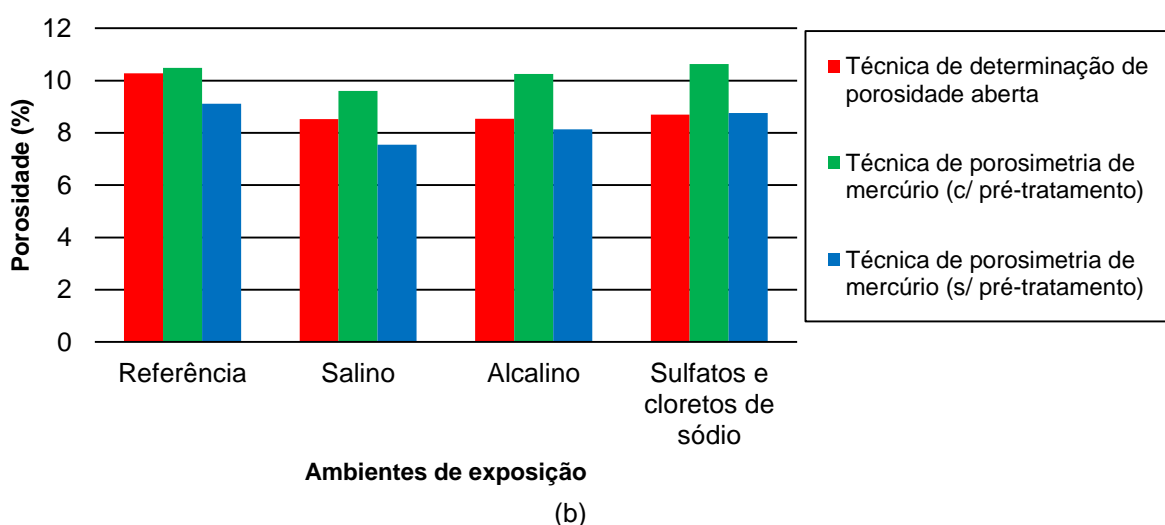
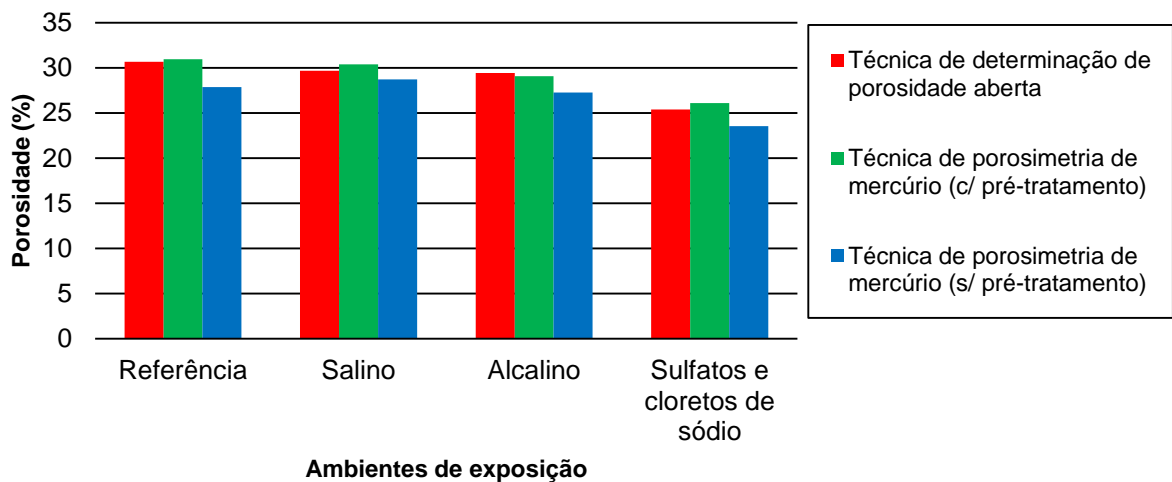
Pode-se constatar que a diminuição da porosidade das amostras sujeitas a ambientes de exposição é causada através da criação de sais que ocupam os poros, provenientes das soluções. Nas amostras de calda, houve um decréscimo de porosidade aberta de cerca 3 a 4% para amostra sujeitas a ambientes salinos e alcalinos e no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio, uma redução de 17%. Em relação às amostras de betão a redução foi de 15 a 17% nos três ambientes.

4.2.4. Ensaio de porosimetria de mercúrio

Os parâmetros obtidos do ensaio de porosimetria de mercúrio encontram-se no Quadro 3.18. Nas amostras com secagem, ao fim das 5800 horas, a porosidade aberta das amostras de calda no ambiente salino diminuiu aproximadamente 2% em relação à amostra de referência. Para o mesmo ambiente, a amostra sem pré-tratamento aumentou a porosidade 3%. No ambiente alcalino, a amostra de calda com secagem diminui 6%, enquanto a amostra sem secagem diminui cerca de 2%, às 5800 horas. As amostras de calda com e sem pré-tratamento sujeitas 5800 horas ao ambiente de sulfatos e cloretos de sódio, tiveram uma diminuição de porosidade aberta de 15 a 16%.

Fazendo uma análise de porosidade aberta comparativa com o ensaio anterior, pode-se verificar que os resultados obtidos nas amostras de calda com pré-tratamento são semelhantes aos das amostras de calda obtidos com a técnica de determinação de porosidade aberta utilizada no ensaio anterior, Figura 4.5 (a). Às 5800 horas, nas amostras de betão com pré-tratamento, a porosidade aberta diminuiu 8% no ambiente salino, 2% no ambiente alcalino e aumentou cerca de 1,5% no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio. A amostra sem secagem apresentou uma redução de porosidade aberta de 17% para o ambiente salino, uma redução de 11% no ambiente alcalino e cerca de 4% no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio.

Relembrando que os resultados foram obtidos por técnicas diferentes (3.4.1.3; 3.4.1.4) e comparando os valores de porosidade aberta das amostras de betão obtidos nas duas técnicas, existe uma grande discrepância, Figura 4.5 (b). Esta discrepância de resultados é devido à amostragem de betão utilizada nos ensaio. Como referido anteriormente, o betão é um material heterogêneo e cada amostra recolhida do provete podem possuir agregados de composições muito diferentes, originando valores de porosidade aberta diferentes e inconclusivos.



(a) Amostras de calda; (b) Amostras de betão

Figura 4.5 – Porosidade de amostras de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição

As desigualdades de valores entre as amostras de calda e betão com pré-tratamento e sem pré-tratamento são devidas à existência de vapor de água nos poros das amostras sem secagem. O vapor de água que se encontra dentro dos poros impede que o mercúrio ocupe o poro na totalidade, obtendo menores valores de porosidade.

Numa primeira análise, a DTP da amostra de referência de calda com pré-tratamento mostra uma maior volume de poros com diâmetro próximo de $0,04\ \mu\text{m}$, enquanto a amostra sem pré-tratamento possui maior quantidade de poros com diâmetro de $0,06\ \mu\text{m}$. No ambiente salino, as DTP das amostras são semelhantes. Aproximadamente entre o intervalo $0,02$ a $0,04\ \mu\text{m}$, a amostra com pré-tratamento possui um menor volume de poros que a amostra sem pré-tratamento. No ambiente alcalino, constata-se pouca alteração na estrutura de poros da calda sem e com pré-tratamento. Verifica-se que no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio, a amostra seca possui uma menor quantidade de poros do que a amostra sem pré-tratamento para poros com diâmetros entre os $0,01$ e os $0,03\ \mu\text{m}$. O pressuposto deste acontecimento é de que o vapor de água esteja a ocupar a maioria dos poros com maior diâmetro da estrutura porosa da calda, resultando numa DTP com menor volume de poros do que a amostra previamente seca.

A amostra de calda de referência apresenta uma maior distribuição de tamanhos de poro que as amostras contaminadas. Na amostra de calda sujeita ao ambiente salino, observa-se um maior volume de poros com diâmetro $0,04\ \mu\text{m}$. A porosidade da amostra de calda submersa no ambiente salino diminui cerca de 2% em relação à de referência. A amostra submersa no ambiente alcalino também possui uma menor DTP do que a amostra de referência. A porosidade reduziu 6%. No ambiente de sulfatos e cloretos de sódio, a DTP da amostra de calda concentra-se em poros com diâmetro entre os $0,03$ e os $0,04\ \mu\text{m}$ e possui uma menor DTP que a amostra de calda de referência. O valor de porosidade reduziu aproximadamente 16% em comparação com a de referência. Conjetura-se que a ocorrência destes fatos se deve à criação de sais provenientes das soluções nos poros com maior diâmetro. Os sais ocupam o espaço dos poros com maior diâmetro, levando a que haja uma diminuição no volume de poros, e por sua vez redução no valor do diâmetro médio de poros, Figura 4.6.

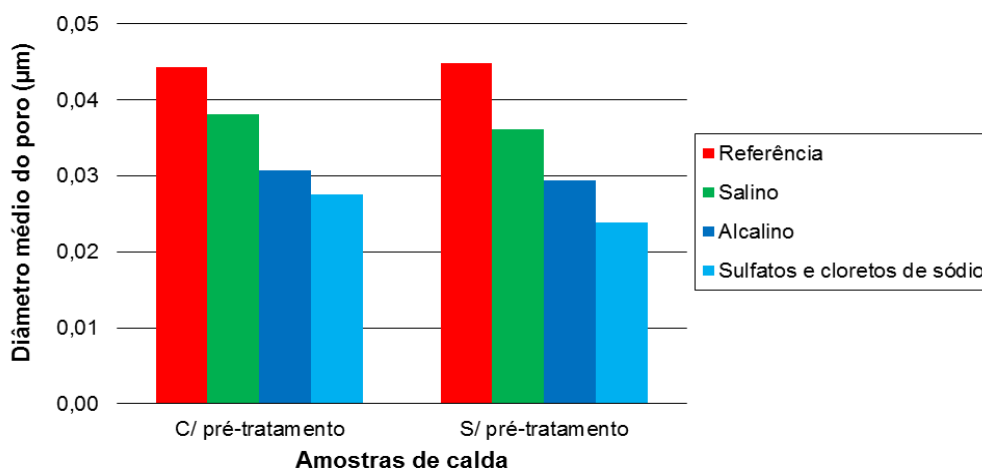


Figura 4.6 – Diâmetro médio do poro das amostras de calda de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição

Nas amostras de betão, tal como nas amostras de calda, o pré-tratamento aplicado nas amostras faz com que se obtenha um DTP maior do que nas amostras sem secagem.

A amostra de betão de referência sem pré-tratamento apresenta uma estrutura porosa com maior concentração de poros de diâmetro igual a $0,07\ \mu\text{m}$, enquanto a amostra com pré-tratamento apresenta maior concentração de poros de diâmetro $0,1\ \mu\text{m}$. Para as amostras de betão contaminadas, a DTP das amostras sem pré-tratamento é menor e possui menor volume de poros que as amostras com pré-tratamento. Pelas mesmas razões das amostras de calda, a pré secagem remove o vapor de água dos poros e possibilita a penetração do mercúrio numa maior gama de diâmetros de poros. Os picos detetados nas amostras submersas na solução alcalina e na de sulfatos e cloretos de sódio nos intervalos de $0,1$ a $1\ \mu\text{m}$, Figura 3.22 (c) e (d), significam irregularidades na superfície da amostra que o mercúrio deteta, não sendo considerados na análise de porosimetria.

Na Figura 3.23, as amostras de betão contaminadas possuem uma maior concentração de poros com menor diâmetro que a amostra de referência, ou seja os poros de maior dimensão das amostras contaminadas pelos reagentes das soluções também foram ocupados por sais.

O ambiente salino é o que altera mais a porosidade da amostra, com um decréscimo de 8% em relação à amostra de referência. O ambiente alcalino pouco reduz a porosidade da amostra. Existe uma redução de 2%. Por outro lado, o ambiente de sulfatos e cloretos de sódio faz aumentar a porosidade da amostra, cerca de 1%. Os sais que se encontram na estrutura da amostra de betão preenchem os espaços dos poros com maior dimensão.

Pode-se constatar também uma alteração do diâmetro médio do poro, afetado pelos ataques químicos provenientes dos ambientes agressivos, que podem ter ocupado o volume dos poros de maior dimensão. Entre as amostras de betão com e sem pré-tratamento, as amostras sem pré-tratamento mostram uma maior redução do diâmetro médio do poro, nomeadamente a amostra sujeita ao ambiente salino, Figura 4.7.

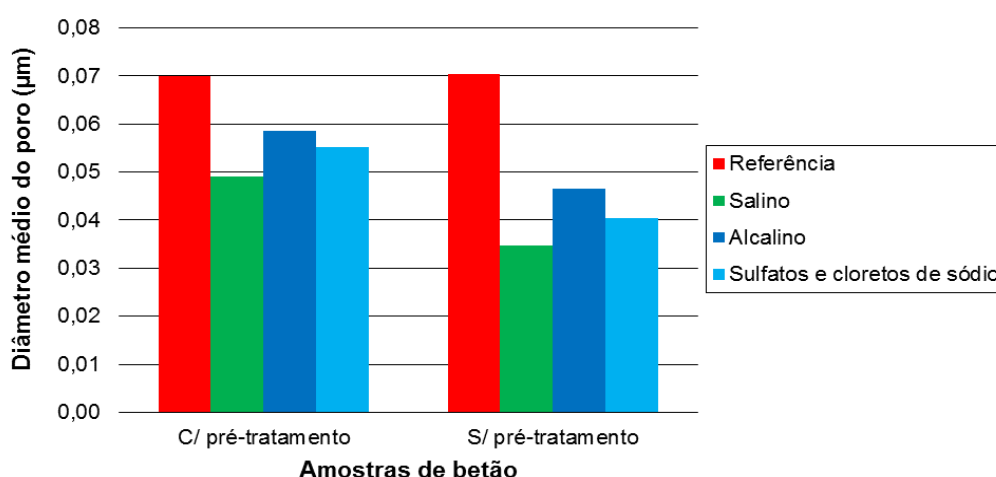


Figura 4.7 – Diâmetro médio do poro das amostras de betão de referência e submersas 5800 horas nos ambientes de exposição

4.2.5. Microscópio eletrônico de varrimento (SEM)

Os resultados obtidos sobre as concentrações de peso dos elementos químicos que constituem as amostras de GFRP antes e após contaminação encontram-se nos Quadros 3.20 a 3.28 e imagens SEM captadas nas Figuras 3.27 a 3.29.

No varão de GFRP sem recobrimento, submerso no ambiente salino, existe uma ligeira alteração na composição da fibra de vidro em relação à amostra de GFRP de referência. Há uma degradação de sílica, que constitui a fibra de vidro, de 4% na periferia do varão e 5% no centro do varão, às 8400 horas. Verifica-se também para o mesmo período de exposição, pouca presença de reagentes provenientes do ambiente salino, como o ião sódio e cloreto, Figura 4.8. Nas fibras de vidro, o composto químico sílica também sofreu pouca alteração nas amostras com recobrimento de calda e de betão às 5800 horas. A concentração diminuiu 4% no centro e 1% na periferia do varão para a amostra de GFRP com recobrimento de betão, em relação à de referência. Na amostra de calda houve uma redução de 3% de sílica no centro e 4% na periferia do varão.

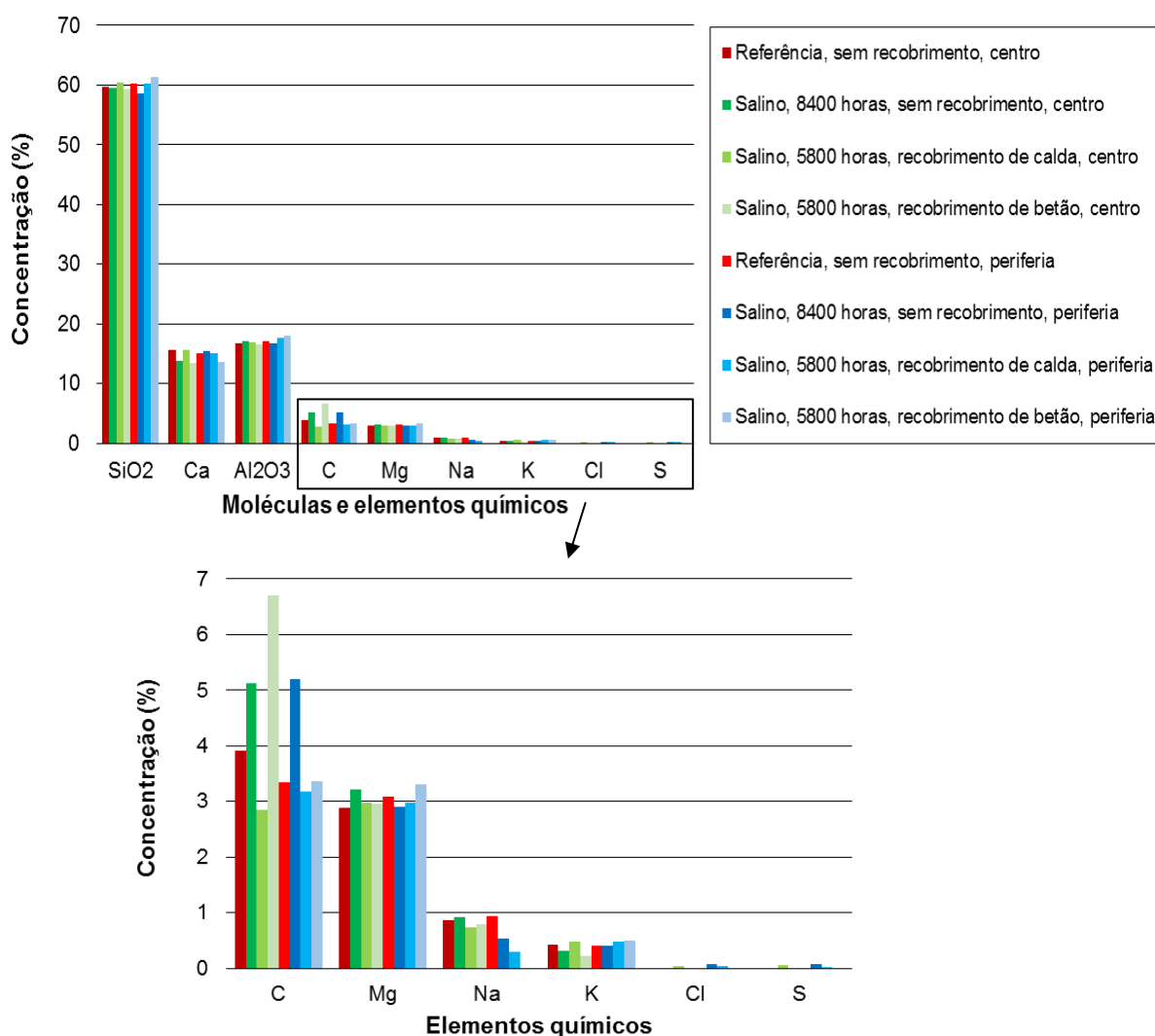


Figura 4.8 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na fibra de vidro dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente salino em pontos selecionados

Em relação à penetração dos reagentes químicos provenientes do ambiente salino, a composição química da resina é detetada pouca alteração das concentrações do ião cloreto e sódio, constatando-se uma maior presença na periferia do que no centro da secção do varão de GFRP, como se pode observar na Figura 4.9.

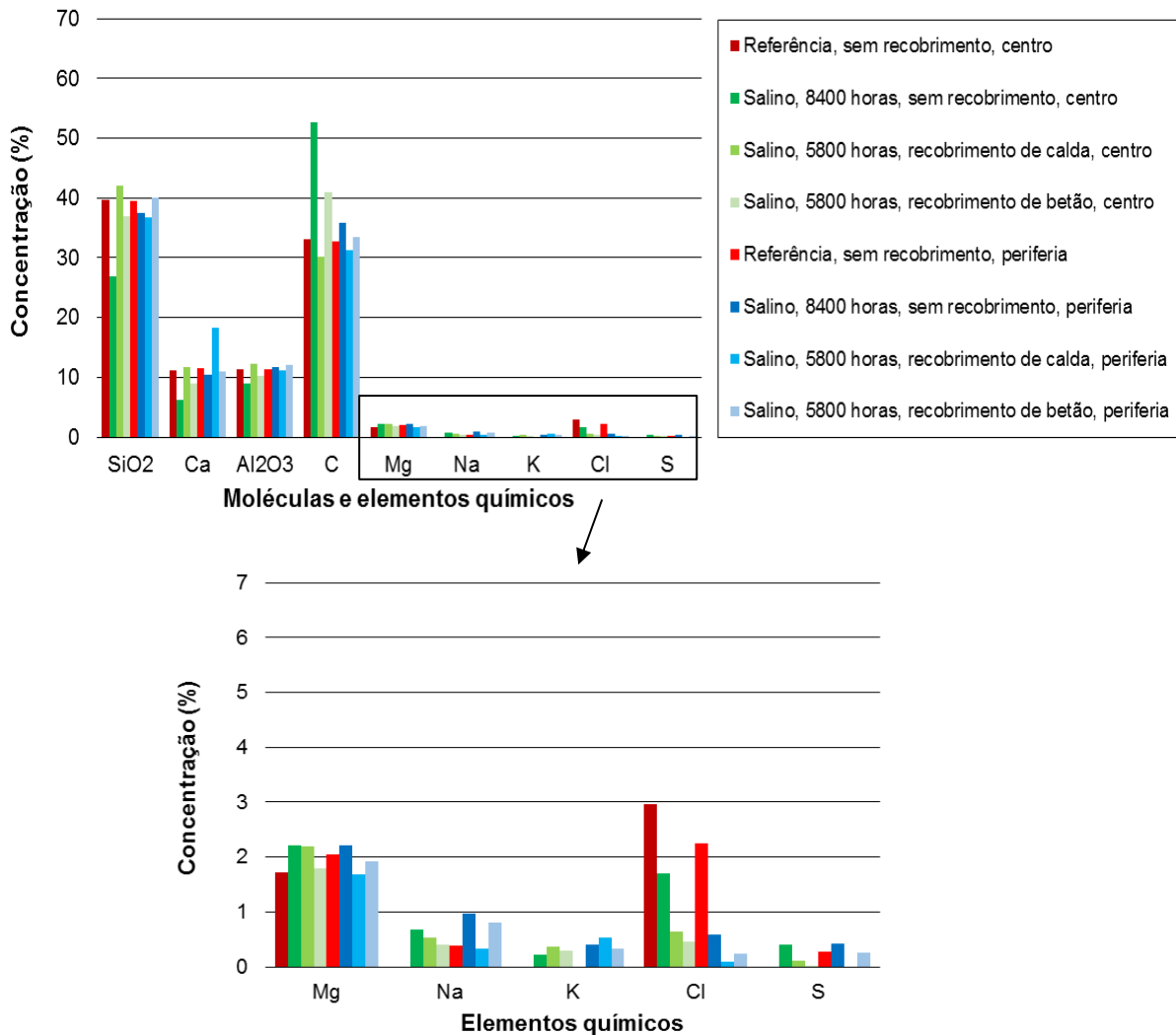


Figura 4.9 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na resina dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente salino em pontos selecionados

Na Figura 4.10, a amostra de GFRP sem recobrimento apresentou ligeiras alterações na concentração de sílica, composto principal, no ambiente alcalino do que nos restantes ambientes. Existe uma perda de concentração de peso da sílica de 4% no centro da secção do varão e 7% na periferia, em relação à amostras de referência, às 8400 horas de exposição. A deteção da concentração dos elementos químicos que constituem a solução alcalina como o sódio, o cálcio e o potássio, é pouco significativa em comparação com os outros elementos químicos da amostra de GFRP ao longo do período de exposição.

No ambiente alcalino às 5800 horas, as amostras com recobrimento de betão e de calda conduziram a uma diminuição na concentração de sílica de 5% no centro e 2% na periferia do varão e 3% no centro e periferia do varão, respetivamente.

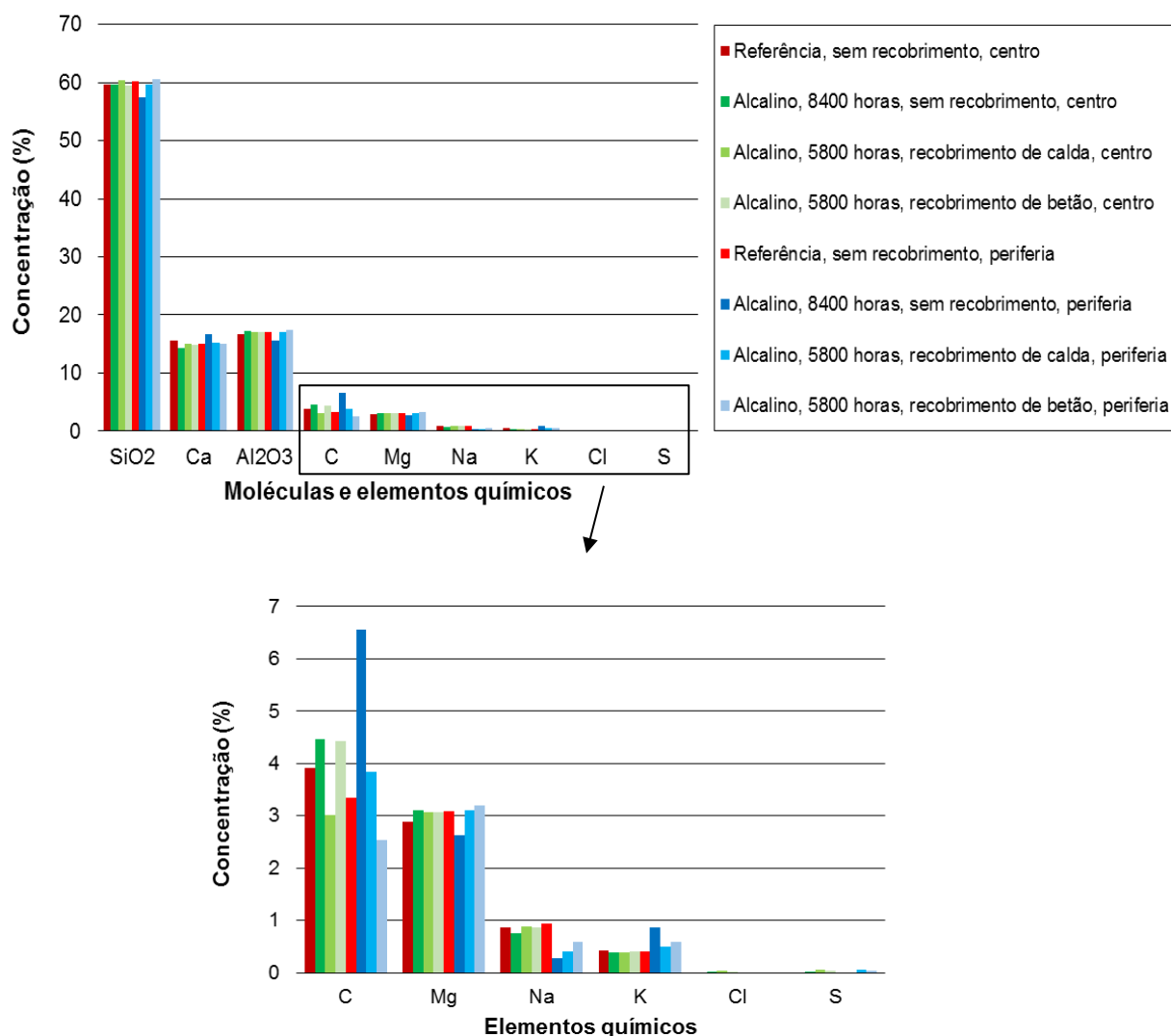


Figura 4.10 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na fibra de vidro dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente alcalino em pontos selecionados

Em relação à resina, verifica-se também pouca variação de concentração dos iões alcali, Figura 4.11. Na concentração do ião carbono seria expectável observar-se uma redução devido aos ataques dos iões de hidróxido na matriz, provenientes do ambiente alcalino. A diferença entre os valores obtidos de concentração do ião carbono pode dever-se ao tipo de amostragem utilizada ou ao critério de seleção de pontos para análise, já que a heterogeneidade do material pode ter influenciado a comparabilidade dos resultados.

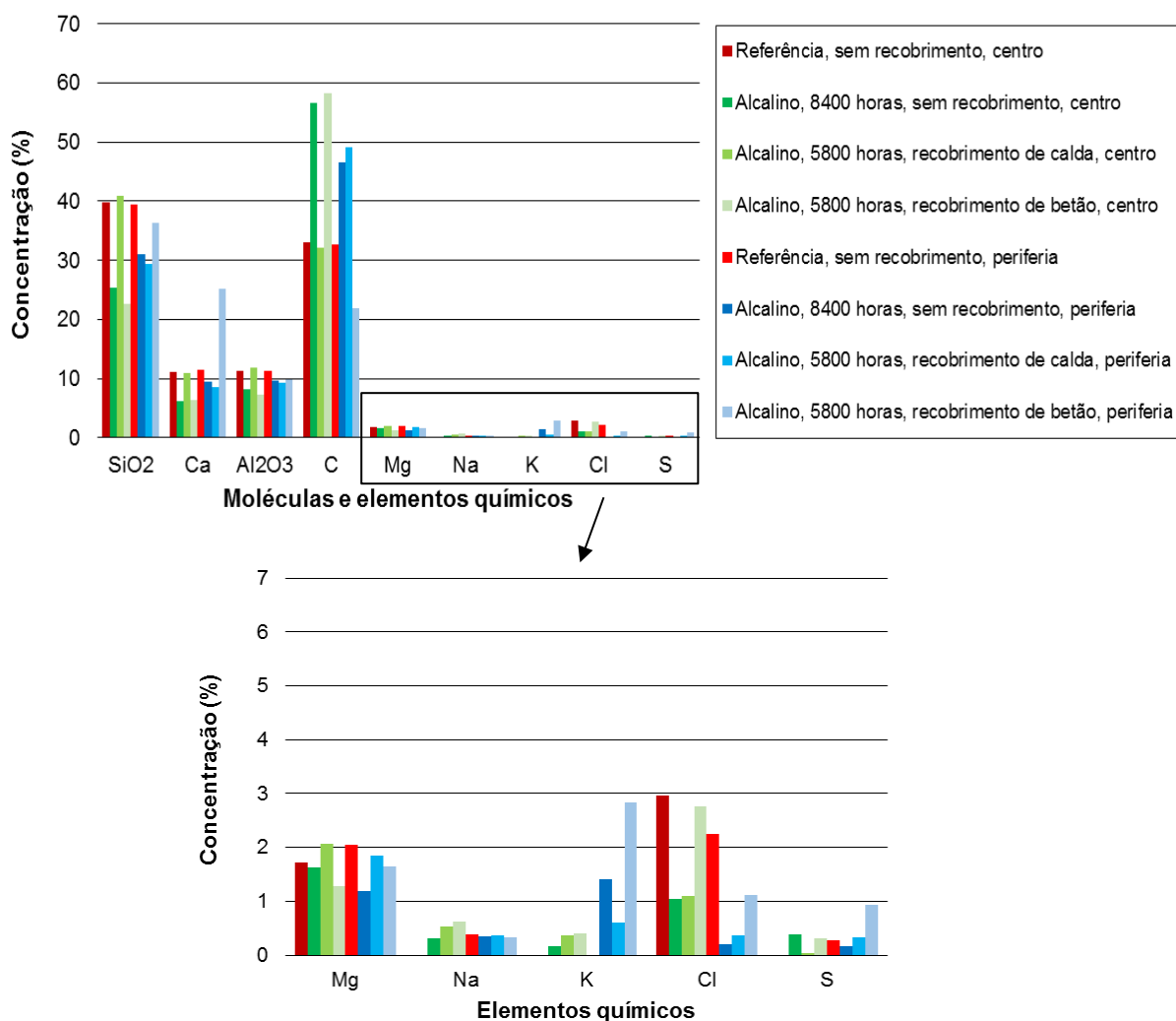


Figura 4.11 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na resina dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente alcalino em pontos selecionados

No ambiente de sulfatos e cloretos de sódio, a amostra de GFRP sem recobrimento teve uma diminuição de concentração de sílica de 4% no centro do varão e 1% na periferia, em relação à amostra de referência, às 8400 horas. Os resultados também estão apresentados na Figura 4.12.

A amostra com recobrimento de betão apresentam um decréscimo de concentração de sílica às 5800 horas num valor de 3% no centro e 4% na periferia do varão de GFRP, enquanto a amostra com recobrimento de calda verifica-se uma redução de 3% no centro e periferia do varão de GFRP, às 5800 horas, como se observa na Figura 4.12.

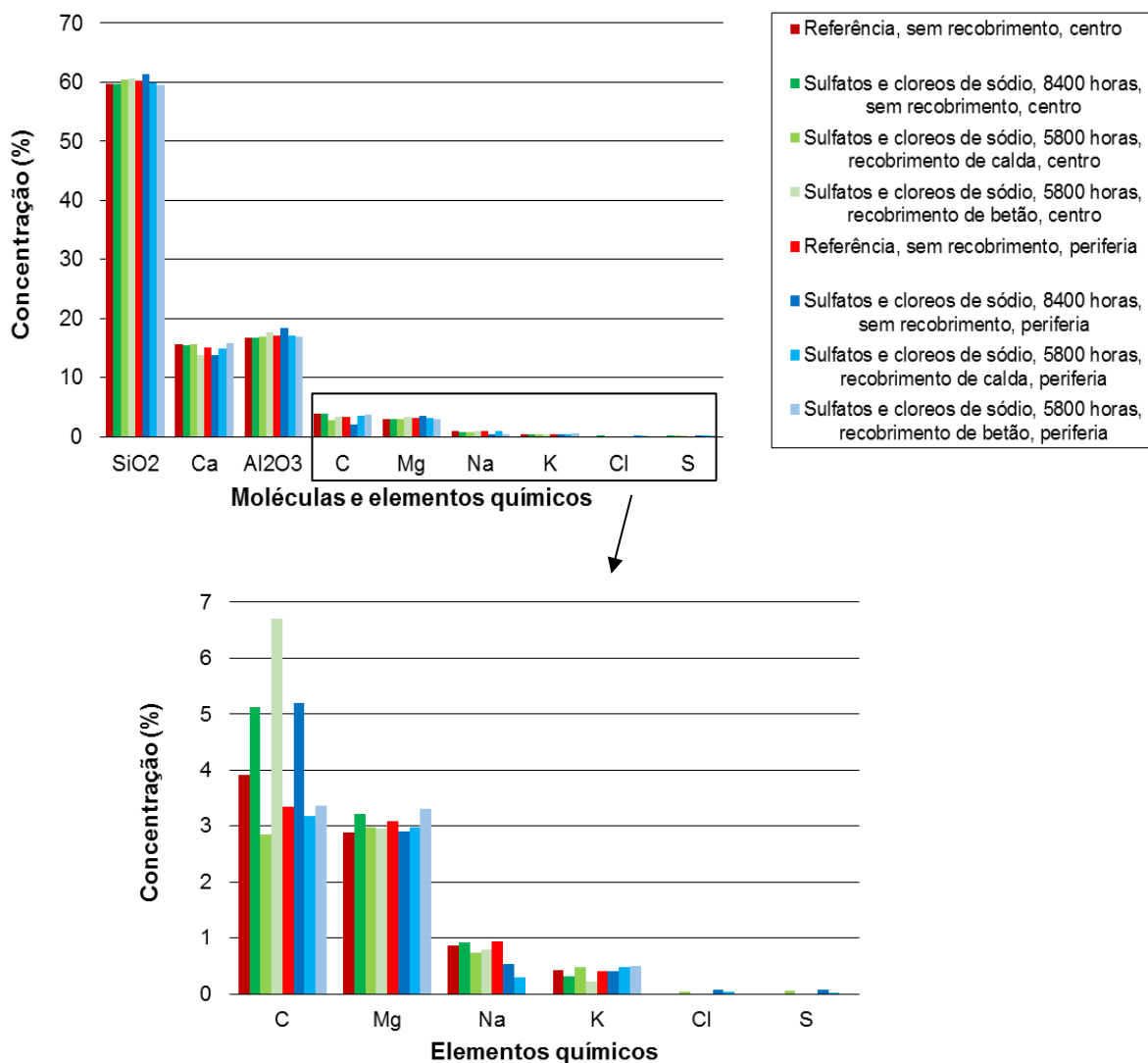


Figura 4.12 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos nas fibras de vidro dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio em pontos

Observa-se uma maior modificação da concentração dos iões de cloreto e enxofre na resina, Figura 4.13, do que na fibra de vidro, Figura 4.12, para varões de GFRP sujeitos ao ambiente de sulfatos e cloretos de sódio. No entanto, a concentração dos reagentes provenientes deste ambiente presente na resina é insignificante em relação aos principais elementos químicos que compõem a resina. É possível observar um comportamento semelhante no estudo efetuado em [25] onde normalmente a resina atua como uma membrana semipermeável, impedido a penetração de iões álcalis.

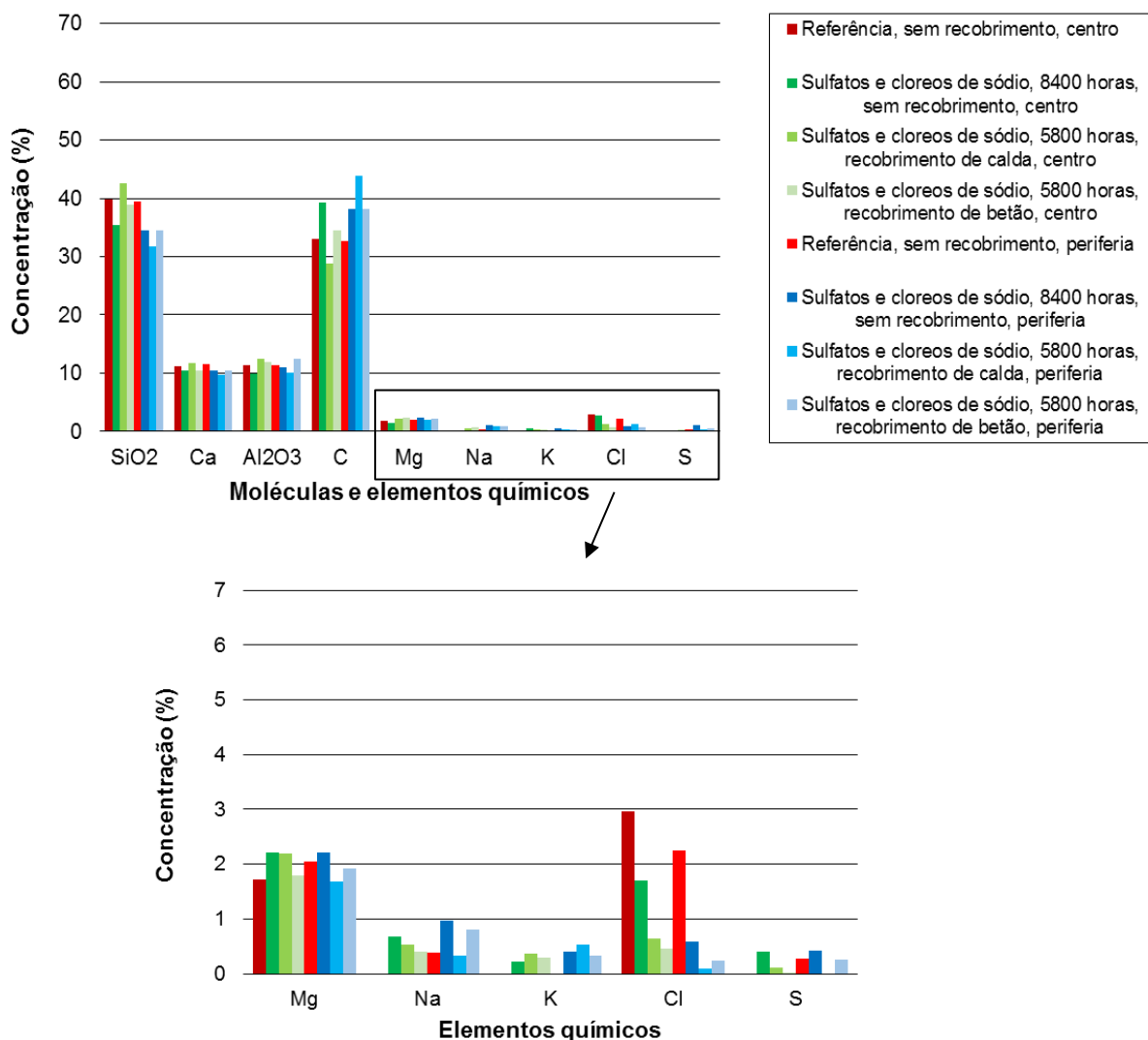


Figura 4.13 – Concentração das moléculas e dos elementos químicos na resina dos varões de GFRP antes e após envelhecimento no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio em pontos selecionados

Nas imagens SEM obtidas neste trabalho, pode-se observar degradação de algumas fibras e resina que constituem a amostra de GFRP analisada, expostas ao ambiente alcalino. A Figura 3.27 apresenta a degradação da amostra de GFRP sem recobrimento às 4500 e 8400 horas no centro e periferia da secção do varão. Pode-se verificar que existe pouca alteração na fibra de vidro, quer ao longo do período de exposição, quer no centro e periferia. Por outro lado, pode-se constatar uma perda de resina na periferia do varão ao fim das 8400 horas, Figura 3.27 (f). Na fase intermédia, às 4500 horas, observam-se alguns vazios na interface resina/fibra, Figura 3.27 (d). No centro do varão, a resina pouco é afetada. Os hidróxidos provenientes da solução alcalina reagiram com a matriz e deterioraram-na. Comportamento semelhante também foi observado no estudo [29].

Nas amostras de GFRP envolvidas em calda, Figura 3.28, a resina e fibra foram menos afetadas. Observando as Figuras 3.28 (a) e (c), a fibra e a resina do centro do varão foram pouco alteradas ao longo do período de exposição. Pouca degradação é visível na resina que se encontra na periferia do

varão, em particular na interface resina/fibra, às 2500 horas. Às 5800 horas existe uma maior perda de resina nessa interface, Figura 3.28 (d).

Na Figura 3.29, são apresentadas as imagens SEM das amostras de GFRP com recobrimento de betão expostas ao ambiente alcalino. É possível observar na Figura 3.29 (a) a deterioração na interface resina/fibra às 2500 horas. Às 5800 horas, constata-se pouca evolução da degradação no centro da secção do varão, Figura 3.29 (c). Existe alguma degradação na resina às 2500 horas na periferia, Figura 3.29 (b), e uma maior perda de resina às 5800 horas, observando-se fibras de vidro não rodeadas de resina, Figura 3.29 (d).

Degradação semelhante pode ser observada na resina do varão e algum dano nas fibras de vidro no estudo realizado por *Dejke* [24]. Em comparação com as imagens SEM obtidas no presente trabalho, para a exposição às 4500 horas no ambiente alcalino, é perceptível uma maior degradação na interface resina/fibra de vidro na região do enrolamento em espiral, elemento que constitui a geometria da superfície do varão de GFRP.

4.2.6. Ensaio de calcinação

Os resultados do ensaio de calcinação podem ser observados no Quadro 3.30. Pode-se verificar uma diminuição de percentagem de resina nas amostras que foram sujeitas aos três ambientes em relação à amostra de referência. Constata-se que a resina da amostra foi-se degradando ao longo do tempo, havendo desta forma uma maior percentagem de fibra de vidro nas amostras com maior período de exposição e menor percentagem de resina, Figura 4.14.

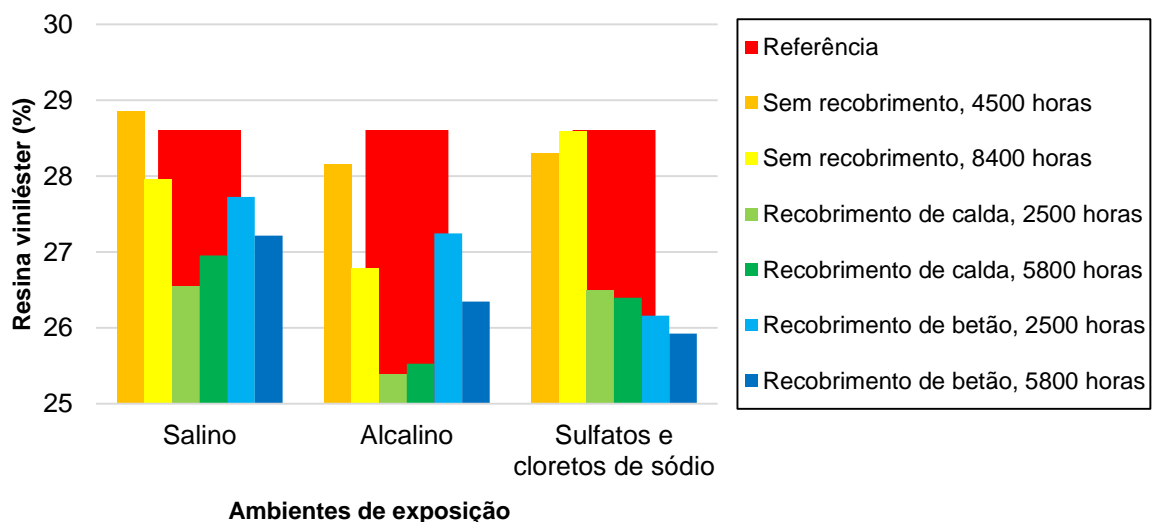


Figura 4.14 – Quantidade de resina viniléster nas amostras de GFRP em diferentes ambientes de exposição

Nas amostras sem recobrimento, não existe praticamente degradação da resina às 4500 horas. No entanto, às 8400 horas, no ambiente alcalino, existe uma perda de 6% na solução alcalina e 2% no ambiente salino. O ambiente de sulfatos e cloretos de sódio danificou pouco a estrutura da resina.

Nas amostras com recobrimento, existe uma maior degradação de resina. Amostras com recobrimento de betão tiveram uma perda de 3% no ambiente salino, 5% no ambiente alcalino e aproximadamente 9% no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio às 2500 horas. Existe um ligeiro aumento de perda de resina às 5800 horas, passando para 5% no ambiente salino, 8% no ambiente alcalino e mantendo-se nos 9% no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio.

Nas amostras de GFRP com recobrimento de calda regista-se uma perda de resina no valor dos 7% no ambiente salino e de sulfatos e cloretos de sódio, enquanto no ambiente alcalino, o varão de GFRP foi mais afetado, perdendo uma percentagem de resina de cerca de 11% às 2500 horas, devido à resina viniléster ser suscetível ao ambiente alcalino, em particular aos iões hidróxidos que despolimerizam a matriz. Os resultados obtidos às 5800 horas são praticamente semelhantes.

Existe uma maior degradação de resina no ambiente alcalino para as amostras de GFRP sem recobrimento e com recobrimento de calda, entre os 6% e os 11%. As amostras com recobrimento de betão manifestam uma maior alteração da resina no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio, num valor de 11%.

4.3. Propriedades mecânicas dos varões de GFRP

4.3.1. Ensaio para determinação de temperatura de transição vítrea através de análise mecânica (DMA)

Na realização do ensaio DMA, obtiveram-se temperaturas de transição vítrea de amostras de GFRP antes e após contaminação de varões sem recobrimento. Os resultados encontram-se no Quadro 3.31 e Figura 3.35. Pode-se verificar que o valor de T_g da amostra de GFRP aumenta às 4500 horas nos três ambientes em relação à amostra de referência, cerca de 5% a 6%. No período de exposição de 8400 horas, a T_g diminui entre 3% a 4% em relação ao T_g obtido às 4500 horas, Figura 4.15.

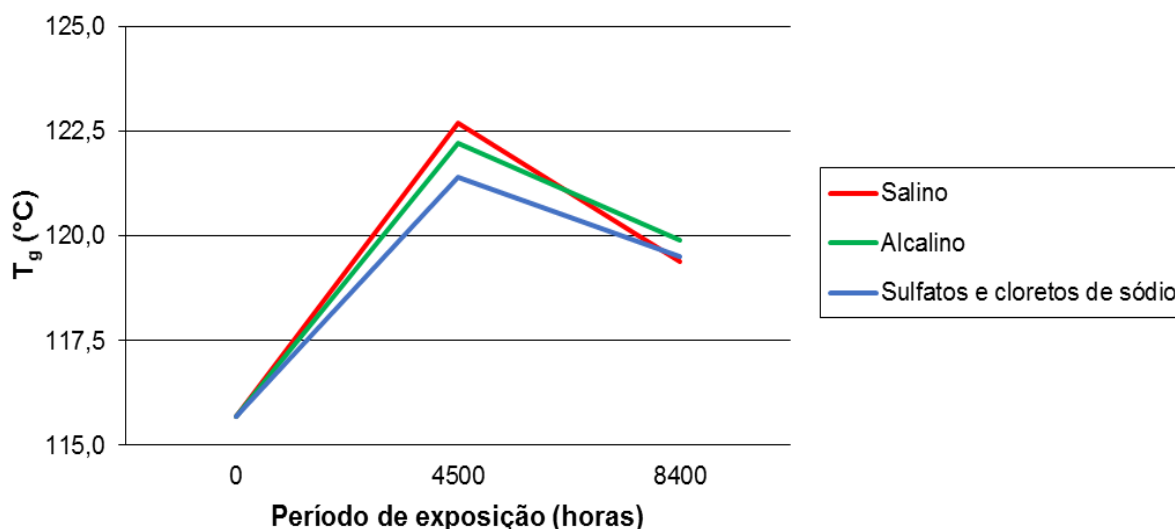


Figura 4.15 – T_g das amostras de GFRP sujeitas aos ambientes de exposição

As alterações são pequenas e dentro de uma dispersão aceitável dos resultados e concluiu-se que a contaminação teve efeitos desprezáveis na temperatura de transição vítrea da resina viniléster. Comportamento semelhante foi observado num estudo conduzido por Dai e He [26].

4.3.2. Ensaio de tração

Toda a evolução dos corpos de ensaio encontra-se nas Figuras 3.38 a 3.40. Os valores de módulo de elasticidade obtidos do ensaio de tração estão apresentados nas Figuras 3.41.

Pode-se constatar que na Figura 3.42, os gráficos de tensão/deformação obtidos de cada corpo de prova, possuem uma fase elástica praticamente linear até à rotura, por aderência de materiais. Os corpos de prova T2 mostram valores de módulo de elasticidade entre os 30 e os 43 GPa, Figura 3.41, estando o valor de módulo de elasticidade tabelado na ficha técnica para os varões ensaiados (43 GPa) dentro deste intervalo. A tensão máxima obtida para os corpos de prova T2 foi de 791,57 MPa. O valor indicado para a tensão de rotura na ficha técnica é de 850 MPa.

Os resultados obtidos de módulo de elasticidade dos corpos de prova T3 diminuíram com os sistemas de aperto utilizados, referido na Figura 3.38. Os valores foram entre 20 a 32 GPa. O resultado da tensão máxima obtido para estes corpos de prova foi de 973,65 MPa, valor superior aos corpos de prova anteriores. No entanto, não foi suficiente para levar a amostra à rotura, mesmo sendo 850 MPa o valor de tensão de rotura tabelado na ficha técnica. A junta criada entre as meias canas proporcionou um aumento de tensão máximo maior que T2 antes de ocorrer a rotura por aderência.

No ensaio à tração do corpo de prova T4, obteve-se um módulo de elasticidade de 42 GPa e um valor de tensão máxima de 1174,05 MPa. O aumento do comprimento das meias canas facultou melhores resultados na obtenção de tensão máxima. A Figura 4.16 (a) mostra o modo de rotura da amostra T4. Observa-se uma rotura por aderência entre a resina e o varão, localizada próxima da meia cana de aço. Constata-se também alguma rotura das fibras que constituem o enrolamento em espiral.

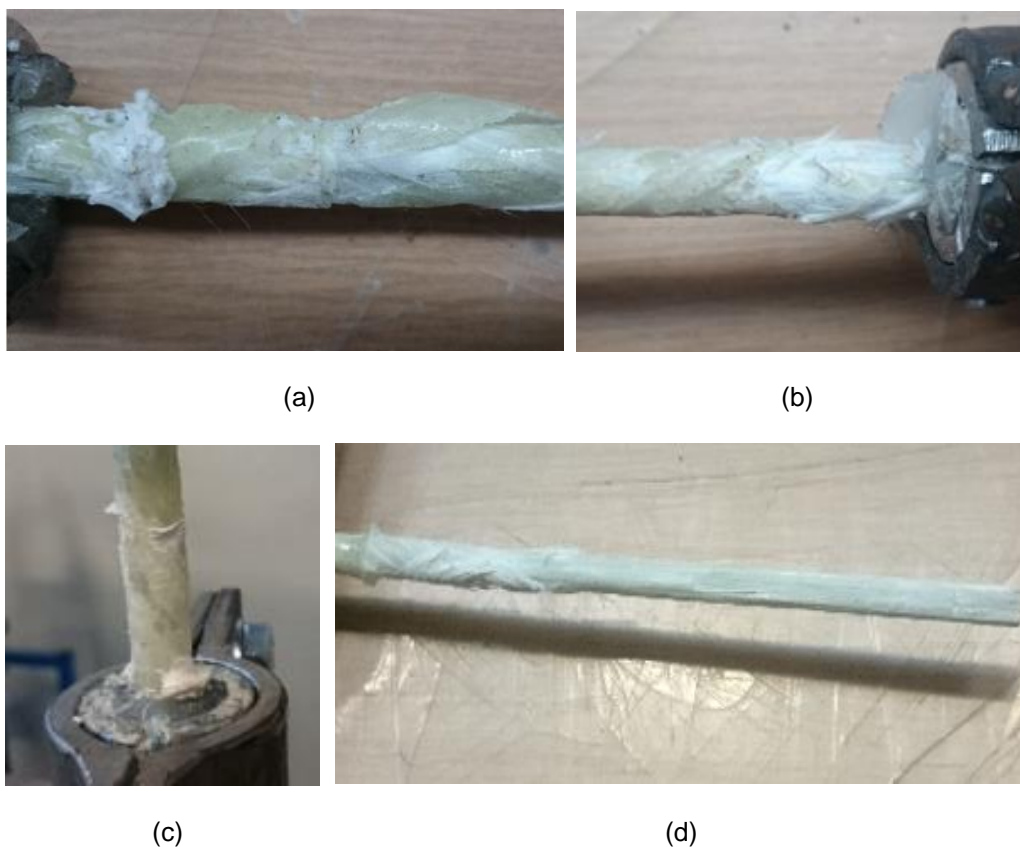
O corpo de prova T5 apresentou resultados de módulo de elasticidade e tensão máxima de 33 GPa e 850 MPa respetivamente. As abraçadeiras de aperto de 5 cm impediram as garras de apertar os 11 cm de comprimento que dispõe. Em T6 o aumento do comprimento das meias canas dos tubos de aço já possibilitaram o aperto das garras nos 11 cm possíveis, Figura 3.39. Constata-se pouca alteração nos resultados obtidos com este mecanismo. O módulo de elasticidade foi de 41 GPa e a tensão máxima resultante foi de 857 MPa.

Em T7, com o aumento do comprimento dos varões, os resultados para alcançar tensão de rotura foram superiores aos anteriores, obtendo-se um valor de 1311,82 MPa. O valor do módulo de elasticidade obtido foi de 36 GPa. O corpo de prova melhorou a capacidade de obter tensões que levem o varão à rotura, em relação aos corpos de prova anteriores. Na Figura 4.16 (b) observa-se rotura de fibras na periferia do varão de GFRP antes de acontecer rotura por aderência entre a resina e o varão de GFRP.

Apesar de possuir o mesmo mecanismo de aperto e comprimento de canas de aço que T7, T8 tem um varão de GFRP com menor comprimento, Figura 3.38. Os resultados obtidos para módulo de elasticidade e tensão máxima alcançada foram de 39 GPa e 923,10 MPa, respetivamente.

No corpo de prova T9 obtiveram-se valores de 1260,51 MPa para a tensão máxima e 42 GPa para o módulo de elasticidade. Mesmo aumentando ligeiramente o comprimento das meias canas e utilizando uma abraçadeira de aperto de 8 cm, Figura 3.40, a tensão máxima obtida não aumentou em relação à amostra T7. Na Figura 4.16 (c) é visível o deslizamento entre os materiais resina/varão de GFRP.

A alteração feita da T9 para a T10 foi a aplicação de entalhes de 1 mm nas extremidades do varão de GFRP, Figura 3.40, e a utilização de resina fornecida pela S&P Clever Reinforcement Iberica Lda em vez da inicial. Obtiveram-se valores de tensão máxima de 1370,52 MPa e um módulo de elasticidade de 55 GPa. No final deste ensaio pode-se observar um desligamento entre o enrolamento em espiral e as fibras axiais do varão de GFRP, Figura 4.16 (d).



(a) Corpo de prova T4; (b) Corpo de prova T7; (c) Corpo de prova T9; (d) Corpo de prova T10.

Figura 4.16 – Modos de rotura dos varões de GFRP no ensaio à tração

Os sistemas de aperto concebidos não permitiram obter valores de tensão tais que levassem o varão à rotura, havendo rotura no final sempre por aderência entre a resina e o varão de fibra de vidro. Apesar

de não ser possível obter valores de tensão de rotura do varão, são conhecidos resultados obtidos para este tipo de ensaio, como os estudos referidos no capítulo 2 [24,29].

Os valores de módulo de elasticidade para diferentes tipos de varão de GFRP de referência obtidos por *Dejke* [24] são semelhantes aos obtidos nesta campanha experimental, sendo entre 30 a 55 GPa.

4.3.3. Ensaio de impacto tipo Charpy

A impossibilidade de obter caracterização à tração dos varões estimulou a decisão de fazer ensaios de impacto. Estes ensaios permitiram analisar a degradação de propriedades mecânicas dos varões de GFRP, nomeadamente a capacidade do varão absorver energia a partir de um impacto aplicado transversalmente no varão, comparando os resultados das amostras de referência com contaminadas.

Os resultados obtidos através do ensaio de impacto do tipo Charpy adaptado para os varões de GFRP encontram-se no Quadro 3.33.

As amostras de referência ensaiadas apresentam uma delaminação de fibras resultante do impacto do pêndulo, Figura 3.46 (a). Essa delaminação concentra-se na zona do entalhe onde ocorreu o impacto. A média da energia absorvida pelas amostras de referência é de 31,75 J.

Nas amostras expostas ao ambiente salino, em relação à amostra de referência, houve uma perda de energia absorvida de 29%, tendo um valor médio 22,44 J. Na Figura 3.46 (b) é possível observar inexistência de resina na periferia do varão, estando as fibras de vidro separadas uma das outras e sem qualquer resina a interliga-las. A delaminação encontra-se principalmente na periferia da amostra.

O ambiente alcalino demonstra maior degradação da resina nas amostras. Na Figura 3.46 (c) verifica-se um vazio no interior da amostra. A resina foi afetada pelos hidróxidos provenientes da solução alcalina e foi deteriorada. Consta-se alguma delaminação e sobretudo desagrupamento de fibras de vidro no interior. A energia absorvida foi menor nas amostras expostas ao ambiente alcalino, com um valor médio de 14,11 J, traduzindo-se numa perda de energia de 56% aproximadamente em relação às amostras de referência.

As amostras de GFRP submersas em ambiente de sulfatos e cloretos de sódio sofreram pouca alteração. A média da energia absorvida foi de 27,34 J, resultando numa perda de energia absorvida em relação às amostras de referência de 14%. Na Figura 3.46 (d) observa-se uma delaminação semelhante à das amostras de referência na região do entalhe e pouca alteração na resina.

Pode-se constatar que as amostras com maior deterioração de resina têm menor capacidade de absorção de energia. As amostras sujeitas ao ambiente de sulfatos e cloretos absorveram um maior valor de energia devido à existência de resina, que tem a função de suportar as fibras e absorver as deformações. A amostra apresenta um modo de rotura com uma deformação acentuada, como mostra a Figura 3.46 (d) semelhante à amostra de referência, Figura 3.46 (a). As amostras submersas nos ambientes salinos e alcalino apresentam modos de rotura com deformação menos destacada pelo fato de a resina se ter deteriorado, resultando num esmagamento e desagrupamento de fibras de vidro.

Na Figura 4.17 está representada a energia absorvida pelas amostras, antes e após envelhecimento nos diferentes ambientes, em função da área da secção resistente.

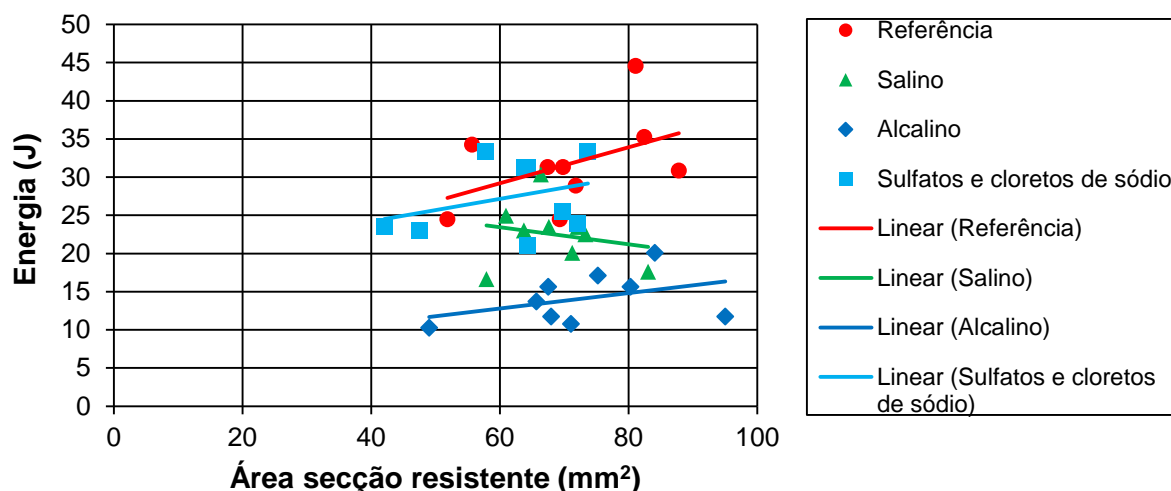


Figura 4.17 – Gráfico energia absorvida em função da área da secção resistente das amostras de GFRP

Pode-se verificar que, à medida que a área de secção resistente aumenta, a capacidade das amostras de GFRP de absorver a energia do impacto também aumenta. Excecionalmente, no ambiente salino, existe proporcionalidade inversa, ou seja quando a área de secção resistente aumenta, a capacidade de absorver energia diminui. Pode-se constatar que a secção resistente das amostras sujeitas ao ambiente alcalino absorvem menos energia do que secções resistentes com a mesma área de amostras de GFRP nos outros ambientes. Pressupõe-se que as secções resistentes contaminadas pelo ambiente alcalino possuam menor quantidade de resina, conduzindo a uma menor capacidade de absorção de deformações.

Capítulo 5

Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1. Conclusões

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a durabilidade de varões de GFRP utilizados na construção. Para esse efeito, foi concretizada uma campanha experimental com o intuito de obter caracterizações físicas e mecânicas dos varões de GFRP e respectivos recobrimentos. Obtiveram-se dados relevantes sobre o comportamento dos materiais expostos a vários agentes de degradação. Foram utilizadas técnicas de várias disciplinas para se detetar e interpretar a degradação causada pelos ambientes agressivos.

As conclusões de maior destaque foram:

- O ambiente alcalino danificou em maior quantidade a resina dos varões de GFRP;
- A calda foi mais suscetível ao ambiente de sulfatos e cloretos de sódio;
- Em geral, a ação da água salgada foi ligeiramente superior à de sulfatos e cloretos de sódio;
- As taxas de absorção dos varões de GFRP com e sem recobrimento apresentaram um patamar inicial elevado, seguido de um patamar de estagnação correspondente à saturação do material, revelando um comportamento aproximadamente Fickiano;
- O ambiente alcalino foi o ambiente que proporcionou maior ganho de massa nos varões de GFRP;
- As curvas experimentais de ganho de massa no ambiente alcalino inicialmente seguiram os padrões de Fick, mas, em fases posteriores, indicaram aumento renovado de sorção associado à degradação dos varões de GFRP;
- A dimensão das partículas do soluto influencia a difusividade. Quanto maior o tamanho, menor a difusividade;
- Houve uma redução na porosidade aberta nas amostras de calda e de betão devida à ocupação de sais provenientes da solução;
- É inconclusivo comparar os resultados obtidos de porosidade aberta entre as amostras de betão devido à heterogeneidade do material;
- Desempenho do recobrimento de betão e de calda mostraram que houve uma redução progressiva do número dos seus poros maiores com o tempo, por unidade de volume. A redução da porosidade foi pequena;
- A presença dos iões provenientes dos ambientes de exposição é pouco detetada na resina pelo fato de ser semipermeável, permitindo apenas penetração de moléculas de água;

- A deteção elementar química que se obteve dos materiais não é suficiente para perceber de maneira rigorosa os efeitos de contaminação ou a possível produção de sais nas amostras;
- A maior parte dos danos foi observada na periferia da secção dos varões e mais visivelmente na resina;
- As imagens SEM de amostras imersas durante aproximadamente 4500 horas mostraram danos à matriz de resina e à interface fibra/resina, consistentes com resultados de estudos de difusão. Às 8400 horas os dados recolhidos não mostraram uma degradação muito mais elevada dos varões em comparação com as 4500 horas;
- A temperatura de transição vítrea do varão de GFRP foi pouco alterada com a contaminação dos ambientes;
- A ocorrência de rotura por aderência nos ensaios de tração pode ser devido à ligação enrolamento em espiral/fibras axiais do varão de GFRP;
- A capacidade de absorção de energia de impacto do varão de GFRP foi mais afetada pelo ambiente alcalino.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Após a conclusão deste trabalho, a campanha experimental permitiu aumentar o conhecimento da durabilidade dos varões de GFRP. Para efeitos de desenvolvimentos futuros, sugere-se que se prossiga o trabalho no âmbito do tema da dissertação.

Assim, devem ser estudados outros fatores de degradação como a utilização das amostras nos ambientes de exposição a 60°C, acelerando desta forma o processo de envelhecimento. Efeitos na durabilidade dos varões de GFRP causados por outros fenómenos como ação gelo-degelo e exposição ao fogo devem ser considerados como estudos futuros. Para um melhor entendimento da evolução da degradação nos varões de GFRP, devem-se adotar intervalos de 1000 em 1000 horas na recolha de análises.

Sugere-se ainda a utilização de varões com maior comprimento, pelo menos 1 m, nos ensaios de tração. A adoção de maiores comprimentos de amarração nas extremidades dos varões de GFRP e a utilização de cordões de soldadura nas abraçadeiras aperfeiçoariam o aperto do mecanismo. Existe também interesse em prosseguir com o desenvolvimento do sistema porticado concebido nesta campanha experimental para ensaios de tração, de modo a testar as capacidades e viabilidade do sistema dimensionado.

A aderência entre os materiais varão de GFRP/betão é também um aspeto a considerar. Estudos de aderência podem ser feitos através de testes de envelhecimento em provetes de betão com varões de GFRP sobressaídos, bem como a realização de ensaios de arrancamento.

Por fim, poderá ter-se em conta estudos de durabilidade em varões de GFRP que apresentem outros tipos de matrizes, nomeadamente a resina poliéster, comparando os efeitos de degradação dos dois tipos de varão.

Referências bibliográficas

- [1] Beijing ZLRC environmental protection equipment co., ltd, www.bjzlrfrp.com, 2017.
- [2] Fiberline composites, www.fiberline.com, 2017.
- [3] Aslan FRP Fiber Reinforced Polymer, www.fiberglass-rebar.blogspot.py, 2016
- [4] Nasseh J. *Métodos avançados de construção em compósitos*, Barracuda Advanced Composites, Rio de Janeiro, 2007.
- [5] Periyasamy A. *Presentation: Glass Fiber Manufacture and Applications*, D.K.T.E Society's Textile Engineering College, Ichalkaranji, Dist – Kolhapur, M.S, 2012.
- [6] Forbes A. *Fiberglass and composite materials. An Enthusiast's Guide to High Performance Non-Metallic Materials for Automotive Racing and Marine Use*. Published by The Berkley Publishing Group, HP books, ISBN: 1-55788-239-8, 1996.
- [7] Fiberline Composites. Fiberline design manual, 2003.
- [8] FIBREBUILD, Masonry, FIBRE NET, 2017.
- [9] Sayed A. *Mise en précontrainte des Bétons Fibrés à Ultra Performance (BFUP) à l'aide de Polymères Renforcés de Fibres de Carbone (PFRC)*. Thèse de doctorat d'Université Paris-Est, 2012.
- [10] Sotiris D, Kypros P, Ewan B. *Durability of fibre reinforced polymers in concrete - procedures for reduced alkalinity exposures*, University of Patras, Patras, Greece, 2007.
- [11] Chen Y, Davalos J, Ray I, Kim H. *Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures*, West Virginia University, Morgantown, 2005.
- [12] Coomarasamy A, Goodman S. *Investigation of the durability characteristics of fiber reinforced plastic (FRP) materials in concrete environment*. J Thermoplast Compos Mater, 1999.
- [13] Chin J, Hughes W, Signor A. *Elevated temperature aging of glass fiber reinforced vinylester and isophthalic polyester composites in water, salt water and concrete pore solution*. In: America Society of Composites, 16th Technical Conference, Blacksburg, VA, 1-12, 2001
- [14] Tannous F, Saadatmanesh H. *Environmental effects on the mechanical properties of E-glass FRP rebars*. ACI Materials Journal, 95(2), 87-100, 1998.

- [15] Micelli F, Nanni A. *Durability of FRP rods for concrete structures*. Construction and Building Mater, 18(7), 491-503, 2004.
- [16] Gentry TR, Bank LC, Thompson BP, Russel JS. *An accelerated-test-based specification for the fiber reinforced plastic for structural systems*. In: Proceedings of 2nd international conference on durability of fiber reinforced polymer (FRP) composites construction, Montreal, Canada, 13-24, 2002.
- [17] Sen R, Mullins G, Salem T. *Durability of E-glass/vinylester reinforcement in alkaline solution*. ACI Structural Journal, 99(3), 369-375, 2002.
- [18] Katsuki F, Uomoto T. *Prediction of deterioration of FRP rods due to alkali attack*. In: Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, RILEM, London, UK, 82-9, 1996.
- [19] Porter ML, Barnes BA. *Accelerated durability of FRP reinforcement for concrete structures*. In Proceedings of the 1st international conference on durability of fiber reinforced polymer (FRP) Composites for Construction, Sherbrooke, Canada, 1998.
- [20] Robert M, Cousin P and Benmokrane B. *Durability of GFRP reinforcing bars embedded in moist concrete*. Journal of Composites of Construction 13, 66-73, 2009.
- [21] Chu W, Karbhari V. *Characterization and moisture and alkali effects on E-glass/vinylester composites*. In: Proceedings of 2nd International Conference on Durability of Fibre Reinforced Polymer Composites for Construction, Montreal, Quebec, Canada, 359-369, 2002.
- [22] Al-Zahrani M. *Tensile strength degradation of glass fiber reinforced polymer bars in aggressive solutions both as stand-alone and cast-in-concrete*. In: Proceedings of the eighth International Conference on FRP reinforcement for concrete structures, Patras, Greece, 1-10, 2007.
- [23] Kim H, Park Y, You Y, Moon C. *Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions*. Compos Structures 83, 37-47, 2008.
- [24] Deijke V. *Durability of FRP Reinforcement in Concrete, Thesis for Licentiate in Engineering*. Chalmers University, 2001.
- [25] Jones F. *Designing composites for durability in aqueous and corrosive environments*. Designing Cost Effective composites, Editor Banks W., 65-81, 1998.
- [26] Dai L, He X. *Experimental Study on Tensile Properties of GFRP Bars Embedded in Concrete Beams with Working Cracks*. School of transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan, China, 2016.
- [27] Gonçalves da Silva M, Cunha P, Ramos A, Fonseca B, Pinho F. *Accelerated action of external sulfate and chloride to study corrosion of tensile steel in reinforced concrete*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Caparica Portugal, 2017.
- [28] Bank LC, Puterman M, Katz A. *Effect of material degradation on bond properties of fiber reinforced plastic reinforcing bars in concrete*. ACI Materials Journal, 95(3), 232-243, 1998.

- [29] Almusallam T, Al-Salloum Y, Alsayed A, El-Gamal S, Aqel M. *Tensile properties degradation of glassfiber-reinforced polymer bars embedded in concrete under severe laboratory and field environmental conditions*. Journal of Composite Materials, Department of Civil Engineering, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia, 2012.
- [30] ASTM D 7205. *Standard test method for tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composite bars*, 2006.
- [31] ACI 440.3R-04. *Guide test methods for fiber reinforced polymer (FRP) for reinforcing or strengthening concrete structures*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2004.
- [32] Correia J, Cabral-Fonseca S, Branco F, Ferreira J, Eusébio M, Rodrigues M. *Durability of glass fibre reinforced polyester (GFRP) pultruded profiles used in civil engineering applications*. In: Proceedings of the Third International Conference – Composites in Construction, Lyon, France, 2005.
- [33] NP EN 12390-3. *Ensaaios de betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes de ensaio*, 2011.
- [34] Chang R. *Química*. Williams College, Tradução: Instituto Superior Técnico – UTL, McGraw-Hill, 1994.
- [35] Carslaw HJ, Jaeger JC. *Conduction of heat in solids*. 2º Edition, Oxford scientific publications, Clarendon Press, printed in Great Britain at the University Printing House, Oxford, printed to the university, 195-331, 1959.
- [36] Gonçalves da Silva M. *Influence of environmental ageing on properties of polymeric mortars*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, 461-468, 2004.
- [37] Carvalho A, Pires J, Cruz A, Matias L. *Estudo e caracterização de argamassas, cerâmicas arquitetónicas e materiais pétreos – o contributo da química, Património – Estudos*, 81-87, 2007.
- [38] Bruker AXS Microanalysis GmbH. *ARTAX User Manual*, 2006.
- [39] Brouwer P. *Theory of XRF - Getting acquainted with the principles*. PANalytical BV, 2010.
- [40] NP EN 1936. *Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*, 2008.
- [41] ISA 15901-1. *Evaluation of pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption – Part 1: Mercury porosimetry*, 2016
- [42] Webb P. *An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data*. Micromeritics Instrument Corp., Norcross, Georgia, January, 2001.
- [43] Moro F, Böhm H. *Ink-Bottle Effect in Mercury Intrusion Porosimetry of Cement-Based Materials*. Journal of Colloid and Interface Science, Volume 246, Issue 1, 135-149, 2002.

- [44] Phenom World, www.phenom-world.com, 2017.
- [45] Phenom World. *Specification sheet | Microscopes, Phenom ProX*. 2016.
- [46] ISO 1172. *Textile-glass-reinforced plastics - Prepregs, moulding compounds and laminates - Determination of the textile-glass and mineral-filler content - Calcination methods*, 1999.
- [47] PerkinElmer, *Introduction to Dynamic Mechanical Analysis (DMA), A Beginner's Guide*. Editor, Waltham, 2008.
- [48] ASTM D 7028. *Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA)*, 2015.
- [49] ASTM D 6110. *Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics*, 2010.
- [50] ISO 179-1. *Plastics - Determination of Charpy impact properties, Part 1: Non-instrumented impact test*, 2010.
- [51] Weisbrod G, Rittel L D. *A method for dynamic fracture toughness determination using short beams*. International Journal of Fracture 104, 89-103, 2000.
- [52] Marcelo N, Almeida J. *Avaliação dos Modos de Falha sob Impacto de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados por Fibras*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.
- [53] Duell J. *Impact Testing of Advanced Composites, Advanced Topics in Characterization of Composites*. Trafford Publishing, 97-112, 2004.
- [54] Fernández-Canteli A, Arguelles A, Viña J, Ramulu M, Kobayashi A. *Dynamic fracture toughness measurements in composites by instrumented Charpy testing: influence of aging*. Composites Science and Technology 62, 1315-1325, 2002.
- [55] ASTM E23. *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, 2007.

Anexos



Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB Glass Fiber Rods / Sand-Coated FRP Bars

DESCRIPTION

The Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB are fabricated from high-strength glass with an extremely durable epoxy using a pultrusion process combined with filament wound spiral deformation.

USE

Reinforcement for concrete elements, especially where corrosion is a factor, such as waterfront structures. Additionally, Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB can be used where concrete elements are subjected to deicing salts or other corrosive agents, or when electrical or magnetic neutrality is required.

ADVANTAGES

- Non-corrosive
- Consistent modulus of elasticity
- Four times lighter than steel
- Non-metallic and non-conductive
- Pre-fabricated angles and bends to ACI standard are available
- Square or rectangle sections available

STANDARD VALUES

MECHANICAL PROPERTIES FOR THE TYFO® FIBR RE-BAR™ GRB GLASS/VINYL ESTER SYSTEM							
Bar Size	Tensile Modulus of Elasticity ¹		Ultimate Tensile Strength		Guaranteed Design Tensile Strength ²		Ultimate Strain in Tension
	E_f		f_u		f_{fu}		ϵ_{ft}
	GPa	Msi	MPa	ksi	MPa	ksi	%
#2	46.1	6.6	877	127	788	114	1.9
#3	43.2	6.3	852	123	765	111	1.97
#4	43.9	6.4	788	114	708	103	1.79
#5	46.7	6.8	761	110	683	99	1.63
#6	46.1	6.7	730	106	656	95	1.58
#8	49.1	7.1	665	96	597	87	1.59

¹ Defined as E_f in the proposed ACI 440-1R-08 design recommendations

² Guaranteed tensile strength is the average ultimate tensile strength minus three times the standard deviation

ADDITIONAL MECHANICAL PROPERTIES FOR THE TYFO® FIBR RE-BAR™ GRB GLASS/VINYL ESTER SYSTEM

Bar Size	Flexural Strength		Flexural Modulus of Elasticity ¹		Ultimate Strain in Flexure ¹	Shear Strength ¹	
	E_f		f_u		ϵ_{ft}	F_s	
	MPa	ksi	GPa	Msi	%	MPa	ksi
#2	1120	162	52.9	7	2.12	225	32.6
#3	929	135	49.5	7.2	1.88	183	27
#4	842	122	44.5	6.4	1.89	220	32
#5	784	114	41.9	6.1	1.87	199	29
#6	707	102	47.3	6.9	1.49	204	30
#8	655	95	46.7	6.8	1.4	206	30

¹ Items not defined in the proposed ACI 440-1R-08

PHYSICAL PROPERTIES FOR THE TYFO® FIBR™ RE-BAR™ GRB GLASS/VINYL ESTER SYSTEM

Bar Size		Cross-sectional Area		Nominal Diameter	
mm	in	mm ²	in ²	mm	in
#10	#3	71	0.11	9.5	3/8
#13	#4	129	0.20	12.7	1/2
#16	#5	200	0.31	15.9	5/8
#19	#6	284	0.44	19.1	3/4
#25	#8	507	0.79	25.4	1

Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB is standard in 20 and 40 foot lengths. Please contact Fyfe Co. LLC for further information.

2/10 Tyfo® Fibr Re-Bar™ GRB

REABILITA Cal Grout

CALDA DE INJECCÃO À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL PARA ALVENARIAS ANTIGAS

TC.E.1089.3

1. DESCRIÇÃO

O **REABILITA CAL Inject** é uma argamassa pré-doseada seca formulada com Cal Hidráulica Natural, destinada ao reforço de alvenarias antigas com o recurso à técnica injeção.

Dispõe de propriedades particulares de elevada fluidez, excelente trabalhabilidade que permitem garantir o preenchimento dos vazios no interior da estrutura a consolidar.

A sua composição à base de cal hidráulica natural assegura uma total compatibilidade química e mecânica com as alvenarias antigas, com características optimizadas tais como, a elasticidade, a permeabilidade ao vapor de água, a resistência aos sais. As suas propriedades hidráulicas garantem o desenvolvimento moderado da resistência mecânica ao longo do tempo, que garantem uma excelente preservação do património histórico.

A não presença de sais solúveis no **REABILITA CAL Inject** minimiza ocorrência de fenómenos de degradação associados à formação de eflorescências.

2. DOMÍNIO DE UTILIZAÇÃO

A **REABILITA CAL Inject** utiliza-se na injeção de alvenarias antigas de tijolo, de pedra ou mistas em elementos estruturais com necessidade de reforço, tais como, paredes resistentes, fundações, pilares, arcos e abóbadas.

A sua excepcional fluidez permite a consolidação do interior das estruturas bem como o tratamento de fissuras.

3. CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

PRODUTO EM PÓ	VALOR	NORMA
Granulometria	< 200 µm	-

PRODUTO EM PASTA	VALOR	NORMA
Água de amassadura	30,0 ± 0,5 %	EN 1015-2
Consumo teórico (Reabilita Cal Inject/litro de pasta)	1,40 kg/lt	-
Espalhamento	> 170 mm	NP EN 445
Massa volúmica	1900 ± 50 kg/m ³	-

PRODUTO ENDURECIDO Após 28 Dias	VALOR	NORMA
Resistência à compressão	> 15 N/mm ²	EN 1015-11
Massa volúmica	1900 ± 50 kg/m ³	EN 1015-10
Módulo de elasticidade	15000 MPa	BS 18281-5
Reação ao fogo	Classe A1	EN 988-2
Condutibilidade térmica	0,67 W.(m/K) (P=50%)	NP EN 1745

4. APLICAÇÃO

Preparação de suportes

As alvenarias deverão ser submetidas a uma intervenção de picagem que remova os antigos revestimentos danificados, para a verificação do estado da alvenaria.

A superfície deve ser lavada com água de forma a eliminar eventuais substâncias solúveis ou insolúveis, nocivas para a técnica de reforço. A lavagem pode ser efectuada com jacto de água, tomando as devidas precauções para não danificar a parede nomeadamente nas juntas ou fendas. Em alternativa à lavagem pode ser efectuada uma limpeza mecânica com escovas metálicas.

As fendas devem ser seladas e a argamassa das juntas deve ser reposta para evitar a fuga da calda durante a operação de injeção. Para o efeito, pode-se utilizar a argamassa **REABILITA Cal Consolidação** ou **REABILITA RA 01**, dependendo do tipo de revestimento pretendido.

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



1/3

www.secilargamassas.pt

REABILITA Cal Grout

CALDA DE INJEÇÃO À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL PARA ALVENARIAS ANTIGAS

TC.E.1089.3

Os furos para colocação dos tubos de injeção são executados, geralmente, com recurso a um berbequim. Evitar furar as unidades da alvenaria, realizando a furação, sempre que possível nas juntas. Os furos normalmente têm um diâmetro variável de 20 a 40 mm, executados com uma ligeira inclinação para baixo e com uma profundidade de cerca de 2/3 da espessura da parede, consoante as necessidades.

Nas estruturas de espessura inferior a 60 cm, os furos são habitualmente realizados de um só lado da estrutura, para espessuras superiores é conveniente proceder à intervenção dos dois lados.

A distribuição dos furos e a sua quantidade deve ser definida após um ensaio prévio em obra, de tal forma, que garanta o preenchimento homogéneo e total dos vazios da estrutura, atendendo às suas características. A distribuição geométrica dos furos deve seguir os vértices dos triângulos de uma malha de triângulos equiláteros, de forma a garantir uma maior cobertura da parede.

Em cada orifício executado introduz-se um tubo de injeção com diâmetros de 15 a 20 mm a uma profundidade de 10 cm, selando-se com a mesma argamassa utilizada na selagem das juntas ou fissuras.

Antes de se proceder à injeção da calda, deve-se injectar água a baixa pressão (até 1 atm) na alvenaria através dos tubos de injeção instalados, a partir dos orifícios mais altos. Este processo permite a remoção do pó e detritos, facilita a penetração da calda, permite verificar se existem obstruções à calda e reduz a absorção de água da calda.

Preparação da calda

O **REABILITA CAL Inject** deve ser amassado por 5 minutos num misturador de alta rotação com cerca de 5,5 a 6,0 litros de água por cada saco de 20 kg, até à obtenção da consistência correta.

Aplicação

Proceder à injeção do **REABILITA Cal Inject** a baixa pressão (até 1 atm no bocal), iniciando-se nos tubos de injeção da fila inferior.

Quando o material surge no tubo de injeção superior, fecha-se o injector inferior e reinicia-se a injeção nos restantes tubos da fila inferior, sucessivamente até ser atingido o nível de tubos do topo.

O **REABILITA CAL Inject** deve ser utilizado até no máximo 60 minutos após a sua mistura.

Por se trata de situações específicas em cada trabalho de reabilitação, deverão ser consultados os nossos serviços técnicos.

Restrições

REABILITA CAL Inject não deve ser aplicado a temperaturas ambientes e de suporte inferiores a 5 °C e superiores a 30 °C.

Conselhos complementares

- ▶ A água de amassadura deve ser isenta de impurezas (argila, matérias orgânicas), devendo, de preferência, ser potável;
- ▶ Não deve ser aplicada qualquer argamassa que tenha ultrapassado o seu tempo aberto. Não amolentar as

argamassas pela adição de água, após preparação;

- ▶ Não adicionar quaisquer outros produtos à argamassa, devendo o **REABILITA Cal Inject**, ser aplicado tal como é apresentado na sua embalagem de origem.

5. EMBALAGEM E VALIDADE

Embalagem

Sacos de papel de 20 kg em paletes plastificadas de 60 sacos.

Validade

12 Meses desde que permaneçam inalteradas as condições da embalagem originais e em condições de armazenagem ao abrigo de temperaturas extremas e da humidade

6. PRODUTOS ASSOCIADOS

▶ Gama REABILITA

(Gama de argamassas de reabilitação e renovação)

7. HIGIENE E SEGURANÇA

(NÃO DISPENSA A CONSULTA DA FICHA DE SEGURANÇA DO PRODUTO)

- ▶ Provoca irritação da pele;
- ▶ Provoca danos graves nos olhos;

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



www.secilargamassas.pt

2/3

REABILITA Cal Grout

CALDA DE INJEÇÃO À BASE DE CAL HIDRÁULICA NATURAL PARA ALVENARIAS ANTIGAS

TC.E.1089.3

- ▶ Pode provocar irritação respiratória;
- ▶ Manter fora do alcance das crianças;
- ▶ Usar luvas de protecção/ vestuário de protecção/ protecção ocular/ protecção facial;
- ▶ Evitar respirar poeiras/ vapores.

Estando as condições de aplicação dos nossos produtos fora do nosso alcance, não nos responsabilizamos pela sua incorreta utilização. É dever do cliente verificar a idoneidade do produto para o fim previsto. Em qualquer caso, a nossa responsabilidade está limitada ao valor da mercadoria por nós fornecida. A informação constante da presente ficha pode ser alterada sem aviso prévio. Em caso de dúvida, e se pretender esclarecimentos complementares, solicitamos o contacto com os nossos serviços técnicos.

Revisão de Abril de 2015
TC.E.1089.3



14

REABILITA Cal Inject

EN 998-2:2010

Argamassa de formulação prescrita para uso geral (G)

Declaração de desempenho TC.E.0820

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.

Apoio ao Cliente: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal

Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilargamassas.pt



3/3

www.secilargamassas.pt

S&P Resin 55



Epoxy Adhesive (Laminating resin)

Description



Solvent-free, transparent 2-component epoxy resin with a formulated amine hardener.

Application areas

S&P Resin 55 is used as a laminating resin for the following S&P Sheet systems:

- S&P C-Sheet
- S&P G-Sheet
- S&P A-Sheet
- S&P slot-applied laminate

Sheets of up to 400 g/m² can be laminated directly on the bearing substrate. Sheets of 400 - 800 g/ m² are pre-impregnated and are applied wet.

Advantages

- Good wettability
- High stability
- High adhesive pull strength on concrete and on steel
- Resistant against bases, diluted acids, saline solutions, mineral oils and aliphatic hydrocarbons
- Weather resistant
- Almost non-yellowing

Product Data

Type

Appearance / Colour Component A Epoxy resin solution: liquid / light yellow
 Component B Hardener for epoxy resin: viscous / light yellow

Delivery Units of: 6 kg
 Container of: 1'000 l

Storage In original packing at + 5 °C to + 25 °C, at least 24 months

Technical Data

(The standard values below indicated are based on +20 °C and 50 % relative humidity of air)

Density	1.11 kg/l
Mixing ratio by weight	2:1 (resin to hardener)
Application temperature	+ 8 °C bis + 35 °C
Application time at + 10 °C	3 h

VER07/16 IND - page 1/3



	+ 20 °C	45 min.
	+ 30 °C	30 min.
Dust-dry after		4 h
Hardening time		7 days
Glass transition temperature (T _g) EMPA 461.427/2		44°C (EN 12614)
Tensile strength after ISO 527-2:1993(E) EMPA 461'427	14 days	35.8 N/mm ²
Elongation at break ISO 527-2:1993(E) EMPA 461'427	14 days	2.3 %
Modulus of elasticity static ISO 7500-1:2004-11 (EMPA 461'427)	14 days	2'581.8 N/mm ²
Modulus of elasticity dynamic EMPA 461.427/2	14 days + 20 °C 14 days - 20 °C	2'515 N/mm ² 2'989 N/mm ²
Adhesive pull strength on concrete job-site tests		failure in concrete
Adhesive pull strength on steel In-house tests		> 15 N/mm ²
Toxicity class	Comp. A	9
Toxicity class	Comp. B	8
Transport class / UN-Nr.	Comp. A	III / 3082
	Comp. B	III / 2735

Treatment:	<p>The S&P Resin 55 is delivered in the prescribed mixing ratios. The hardener (Comp. B) is poured into the resin (Comp. A). It is important that the hardener is used up completely. Mixing of both components is preferably done by means of a low speed drill equipped with a mixing paddle. Mix thoroughly and carefully scrape the sides and bottom of the container while mixing to ensure that the hardener is evenly distributed vertically as well. After blending, the mix must be homogeneous, i.e. without streaks. The temperature of both components at the moment of mixing should ideally be 15 °C – 20 °C. Higher temperatures reduce the application time considerably.</p> <p>The S&P Resin 55 must be protected from moisture for 6 –8 hours after the application. Should any contact with moisture occur during this period, the surface will turn white and tacky; the resin below, however, will still cure perfectly. In discoloured or tacky areas, the bond to any subsequent coating is either reduced or completely prevented.</p>
-------------------	---

Safety precautions:	When fully cured, the S&P Resin 55 is physiologically harmless. However, the hardener (Comp. B) is caustic. Strict measures must be taken to ensure that there is no skin contact with the resin (Comp. A) or the hardener (Comp. B). It is recommended to wear rubber gloves during handling and application. Should skin contact occur, rinse with soap and plenty of water. Should eye contact occur, rinse at once with plenty of water and use an eye washing kit (available in pharmacies). Seek medical advice immediately.
Important Safety instructions	For detailed safety information, it is recommended that you seek advice in the current safety data sheet on www.sp-reinforcement.eu .



Country-specific data	The information in this product data sheet is valid for products delivered by S&P Clever Reinforcement Company AG, Switzerland. Please note that the information in other countries may differ, and use local product data sheet for each respective country.
Specific indication	<p>The information and data in this technical data sheet are made to ensure the normal intended use and normal application suitability; the information and data is based on our knowledge and experience. This does not absolve the user from their own responsibility to check the suitability and application methods.</p> <p>The rights to make changes to product specifications are reserved. Furthermore, our general sales and delivery terms do apply. The most recent product data sheet is valid, and should therefore be requested from us.</p>



S&P Clever Reinforcement Company AG • Seewerstr. 127 • CH-8428 Seewen • Tel. 041 826 00 70 • Fax 041 826 00 76 • www.sp-reinforcement.eu

VER07/16_IND – page 3/3

Anexo D

Análise da composição química do betão – pela empresa Lusical S.A.

Amostra de betão de referência

Attn.: FIBAC Labo

Page 1 / 1
Laboratoire Qualité
15 rue Henri Dagallier
F - 38000 GRENOBLE
Tél : ++ 33 (0) 4 76 33 58 00
Fax : ++ 33 (0) 4 76 33 58 33

Date : 07.04.2017

Certificat de contrôle qualité

Produit : 41023 - Chaux vive Divers

Point d'expédition : Centro Administrativo
Date prél. échant. : 09.03.2017

Commentaire : Universidade Nova de Lisboa T1-R 20g

Lot de contrôle 90000855495

Caractéristique	Unité	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure
CaO	%	35.67		
Ca(OH) ₂ sur brut	%	12.3		
MgO	%	0.34		
Fe ₂ O ₃	%	0.729		
Al ₂ O ₃	%	1.857		
SiO ₂	%	33.61		
K ₂ O	%	0.772		
Mn ₃ O ₄	%	0.017		
SO ₃	%	0.477		
P ₂ O ₅	%	0.007		
Perte au feu 1000°C	%	26.35		
CO ₂	%	23.35		
H ₂ O combinée	%	3.00		
CaCO ₃	%	53.10		
CaO libre	%	5.6		

Meilleures salutations.

Maud Peyrache
Responsable Laboratoire

Amostra de betão sujeita a ambiente salino – às 2500 horas

Attn.: FIBAC Labo

Page 1 / 1
Laboratoire Qualité
15 rue Henri Dagallier
F - 38000 GRENOBLE
Tél : ++ 33 (0) 4 76 33 58 00
Fax : ++ 33 (0) 4 76 33 58 33

Date : 07.04.2017

Certificat de contrôle qualité

Produit : 41023 - Chaux vive Divers

Point d'expédition : Centro Administrativo

Date prél. échant. : 09.03.2017

Commentaire : Universidade Nova de Lisboa T2-R 20g

Lot de contrôle 90000855496

Caractéristique	Unité	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure
CaO	%	34.51		
Ca(OH) ₂ sur brut	%	7.5		
MgO	%	0.40		
Fe ₂ O ₃	%	0.673		
Al ₂ O ₃	%	1.988		
SiO ₂	%	35.15		
K ₂ O	%	0.740		
Mn ₃ O ₄	%	0.018		
SO ₃	%	0.480		
P ₂ O ₅	%	0.005		
Perte au feu 1000°C	%	25.91		
CO ₂	%	24.10		
H ₂ O combinée	%	1.81		
CaCO ₃	%	54.80		
CaO libre	%	3.5		

Meilleures salutations.

Maud Peyrache
Responsable Laboratoire

Amostra de betão sujeita a ambiente salino – às 5800 horas

Attn.: FIBAC Labo

Page 1 / 1
 Laboratoire Qualité
 15 rue Henri Dagallier
 F - 38000 GRENOBLE
 Tél : ++ 33 (0) 4 76 33 58 00
 Fax : ++ 33 (0) 4 76 33 58 33

Date : 07.04.2017

Certificat de contrôle qualité

Produit : 41023 - Chaux vive Divers

Point d'expédition : Centro Administrativo

Date prél. échant. : 09.03.2017

Commentaire : Universidade Nova de Lisboa T3-R 20g

Lot de contrôle 90000855497

Caractéristique	Unité	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure
CaO	%	34.43		
Ca(OH) ₂ sur brut	%	8.4		
MgO	%	0.40		
Fe ₂ O ₃	%	0.714		
Al ₂ O ₃	%	1.903		
SiO ₂	%	35.60		
K ₂ O	%	0.716		
Mn ₃ O ₄	%	0.017		
SO ₃	%	0.467		
P ₂ O ₅	%	0.007		
Perte au feu 1000°C	%	25.70		
CO ₂	%	23.65		
H ₂ O combinée	%	2.05		
CaCO ₃	%	53.78		
CaO libre	%	4.0		

Meilleures salutations.

Maud Peyrache
 Responsable Laboratoire

Amostra de betão sujeita a ambiente alcalino – às 2500 horas

Attn.: FIBAC Labo

Page 1 / 1
Laboratoire Qualité
15 rue Henri Dagallier
F - 38000 GRENOBLE
Tél : ++ 33 (0) 4 76 33 58 00
Fax : ++ 33 (0) 4 76 33 58 33

Date : 07.04.2017

Certificat de contrôle qualité

Produit : 41023 - Chaux vive Divers

Point d'expédition : Centro Administrativo

Date prél. échant. : 09.03.2017

Commentaire : Universidade Nova de Lisboa T4-R 20g

Lot de contrôle 90000855498

Caractéristique	Unité	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure
CaO	%	30.84		
Ca(OH) ₂ sur brut	%	10.5		
MgO	%	0.39		
Fe ₂ O ₃	%	0.818		
Al ₂ O ₃	%	2.278		
SiO ₂	%	42.41		
K ₂ O	%	1.006		
Mn ₃ O ₄	%	0.019		
SO ₃	%	0.572		
P ₂ O ₅	%	0.007		
Perte au feu 1000°C	%	22.19		
CO ₂	%	19.63		
H ₂ O combinée	%	2.56		
CaCO ₃	%	44.64		
CaO libre	%	5.4		

Meilleures salutations.

Maud Peyrache
Responsable Laboratoire

Amostra de betão sujeita a ambiente alcalino – às 5800 horas

Attn.: FIBAC Labo

Page 1 / 1
Laboratoire Qualité
15 rue Henri Dagallier
F - 38000 GRENOBLE
Tél : ++ 33 (0) 4 76 33 58 00
Fax : ++ 33 (0) 4 76 33 58 33

Date : 07.04.2017

Certificat de contrôle qualité

Produit : 41023 - Chaux vive Divers

Point d'expédition : Centro Administrativo

Date prél. échant. : 09.03.2017

Commentaire : Universidade Nova de Lisboa T5-R 20g

Lot de contrôle 90000855499

Caractéristique	Unité	Valeur	Limite inférieure	Limite supérieure
CaO	%	32.41		
Ca(OH) ₂ sur brut	%	5.9		
MgO	%	0.36		
Fe ₂ O ₃	%	0.714		
Al ₂ O ₃	%	2.145		
SiO ₂	%	38.74		
K ₂ O	%	1.287		
Mn ₃ O ₄	%	0.017		
SO ₃	%	0.530		
P ₂ O ₅	%	0.007		
Perte au feu 1000°C	%	23.73		
CO ₂	%	22.29		
H ₂ O combinée	%	1.44		
CaCO ₃	%	50.69		
CaO libre	%	3.6		

Meilleures salutations.

Maud Peyrache
Responsable Laboratoire

Anexo E

Análise da composição química do betão – pela empresa Secil S.A.

Amostra de betão de referência



Laboratório de Qualidade
e Processo do Outão

Relatório de Ensaio

Cliente:

Centro de Desenvolvimento de Aplicações de Cimento
Secil S.A.
Outão

Relatório nº

0411/2017

Data de emissão

13-04-2017

Identificação da amostra

Amostra nº 70.335

Data de amostragem 2017

Designação da amostra Betão - Amostra 1

Proveniência FCT

Data de recepção

12-04-2017

Data de início dos ensaios

13-04-2017

Data de fim dos ensaios

13-04-2017

Resultado(s) do(s) ensaio(s)

Parâmetro	Resultado	Unidades	Método
Ensaio(s) químicos			
Cloretos *	0,03	% (m/m)	NP EN 196-2:2014 (sec 4.5.16)

Responsável do Laboratório

Pedro Gago

Pedro Gago (13 de abr de 2017)

Pedro Gago

* - Ensaio não acreditado

Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra.
Os resultados referem-se exclusivamente à amostra acima identificada.
A amostragem e os dados de identificação da amostra não são da responsabilidade do laboratório.



Apartado 71
2901-864 Setúbal
PORTUGAL
tel. +351 212 198 100
fax +351 265234629
e-mail: lqlo@secil.pt
site: www.secil.pt
NIF PT 500 243 590

Página 1 de 1
PT L 04 07/06 L

Amostra de betão sujeita a ambiente salino – às 2500 horas



Laboratório de Qualidade
e Processo do Outão

Relatório de Ensaio

Cliente:
Centro de Desenvolvimento de Aplicações de Cimento
Secil S.A.
Outão

Relatório nº 0412/2017
Data de emissão 13-04-2017

Identificação da amostra

Amostra nº 70.336
Data de amostragem 2017
Designação da amostra Betão - Amostra 2
Proveniência FCT

Data de recepção 12-04-2017
Data de início dos ensaios 13-04-2017
Data de fim dos ensaios 13-04-2017

Resultado(s) do(s) ensaio(s)

Parâmetro	Resultado	Unidades	Método
Ensaio químicos			
Cloretos *	0,15	% (m/m)	NP EN 196-2:2014 (sec 4.5.16)

Responsável do Laboratório


Pedro Gago (13 de abr de 2017)

Pedro Gago

* - Ensaio não acreditado

Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra.
Os resultados referem-se exclusivamente à amostra acima identificada.
A amostragem e os dados de identificação da amostra não são da responsabilidade do laboratório.



Apartado 71
2901-864 Setúbal
PORTUGAL
tel. +351 212 198 100
fax. +351 265234629
e-mail: lqlo@secil.pt
site: www.secil.pt
NIF PT 500 243 590

Página 1 de 1
PT L 04 07/06 L

Amostra de betão sujeita a ambiente salino – às 5800 horas



Laboratório de Qualidade
e Processo do Outão

Relatório de Ensaio

Cliente:

Centro de Desenvolvimento de Aplicações de Cimento
Secil S.A.
Outão

Relatório nº 0413/2017
Data de emissão 13-04-2017

Identificação da amostra

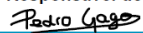
Amostra nº 70.337
Data de amostragem 2017
Designação da amostra Betão - Amostra 3
Proveniência FCT

Data de recepção 12-04-2017
Data de início dos ensaios 13-04-2017
Data de fim dos ensaios 13-04-2017

Resultado(s) do(s) ensaio(s)

Parâmetro	Resultado	Unidades	Método
Ensaio químicos			
Cloretos *	0,38	% (m/m)	NP EN 196-2:2014 (sec 4.5.16)

Responsável do Laboratório


Pedro Gago (13 de abr de 2017)
Pedro Gago

* - Ensaio não acreditado

Este relatório só pode ser reproduzido na íntegra.
Os resultados referem-se exclusivamente à amostra acima identificada.
A amostragem e os dados de identificação da amostra não são da responsabilidade do laboratório.



Apartado 71
2901-864 Setúbal
PORTUGAL
tel. +351 212 198 100
fax +351 265234629
e-mail: lqlo@secil.pt
site: www.secil.pt
NIF PT 500 243 580

Página 1 de 1
PT L 04 07/06 L

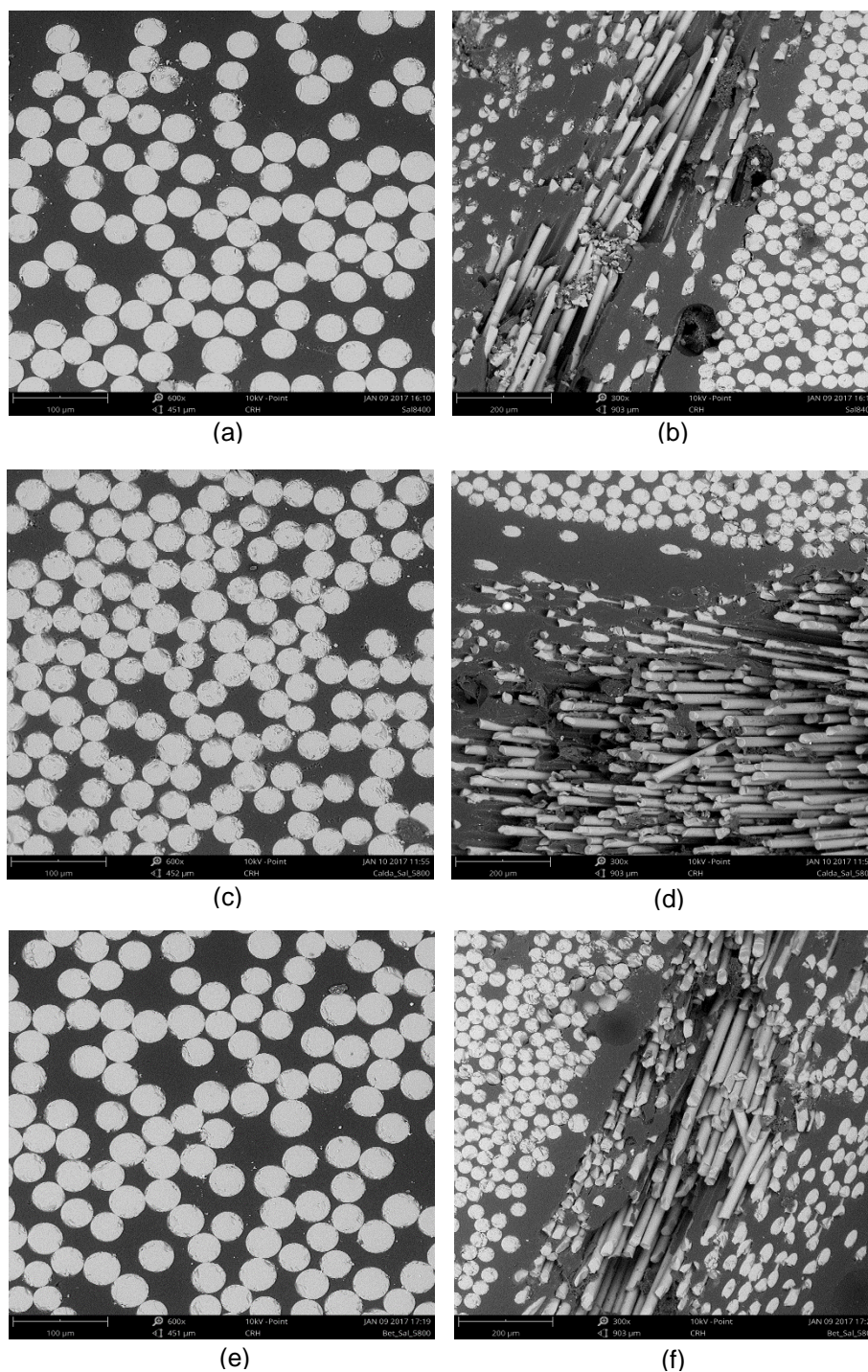
Anexo F

Parâmetros do penetrômetro

Parâmetros do penetrômetro					
Penetrômetro:	0999 - (07) 5 Bulbo, 0.392 haste, Solida				
Constante pen.	11.117	µL/pF	Peso pen.	62.8880	g
Volume haste	0.3920	mL	Máxima pressão inicial	4.4500	psia
Volume pen.	5.8936	mL	Peso conjunto	131.8330	g
Parâmetros Hg					
Ângulo de contacto adv.	140.000	graus	Ângulo de contacto rec.	140.000	graus
Tensão de superfície Hg	485.000	dynes/cm	Densidade Hg	13.5335	g/mL
Baixa pressão			Alta pressão		
Evolução da pressão:	50	µmHg	-	-	-
Tempo de evacuação	5	mins	-	-	-
Pressão de enchimento Hg	0.53	psia	-	-	-
Tempo de equilíbrio	20	seg	Tempo de equilíbrio	20	seg
Máximo volume de intrusão	100.000	mL/g	Máximo volume de intrusão	100.000	mL/g

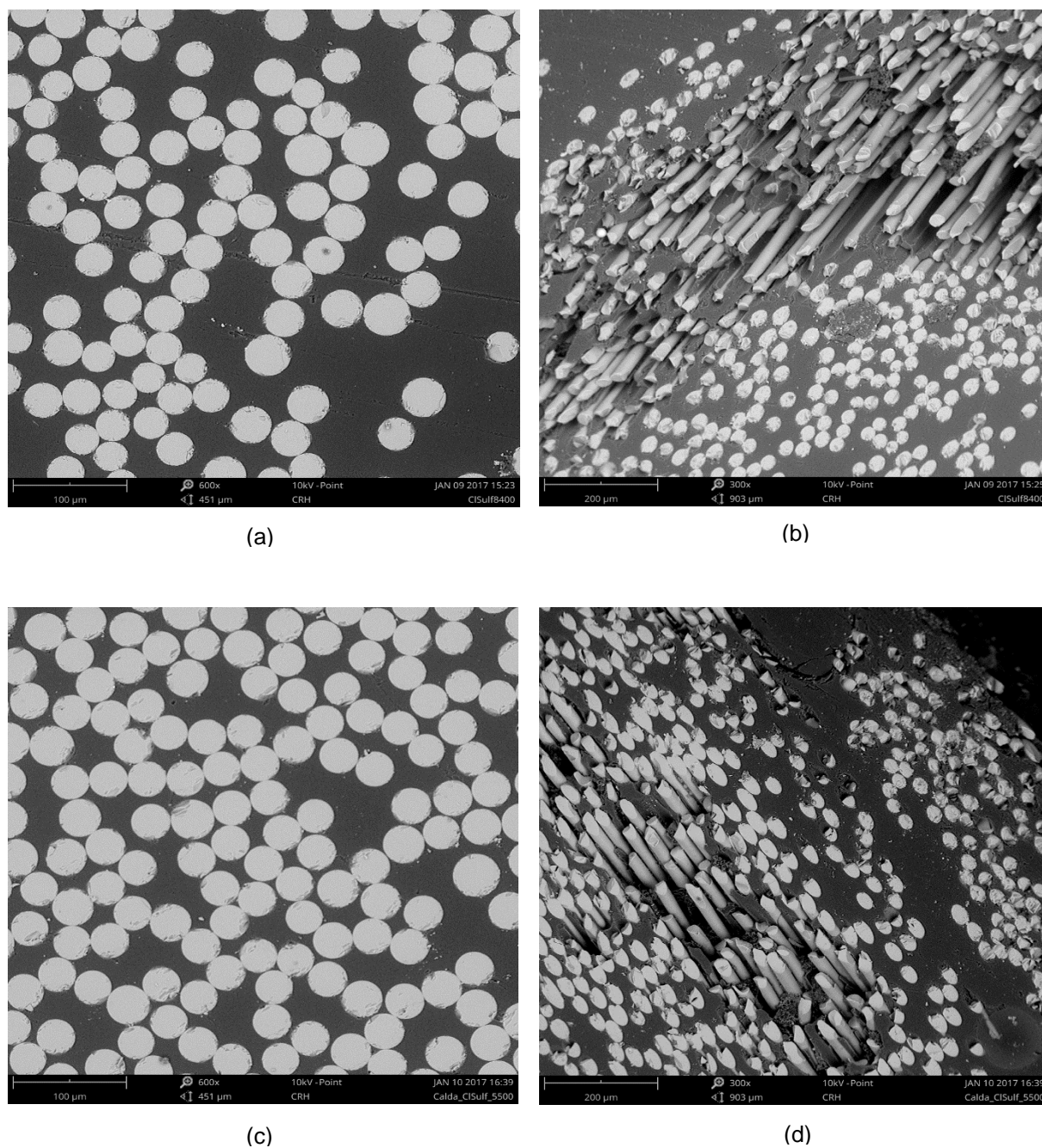
Anexo G

Imagens SEM das amostras de GFRP



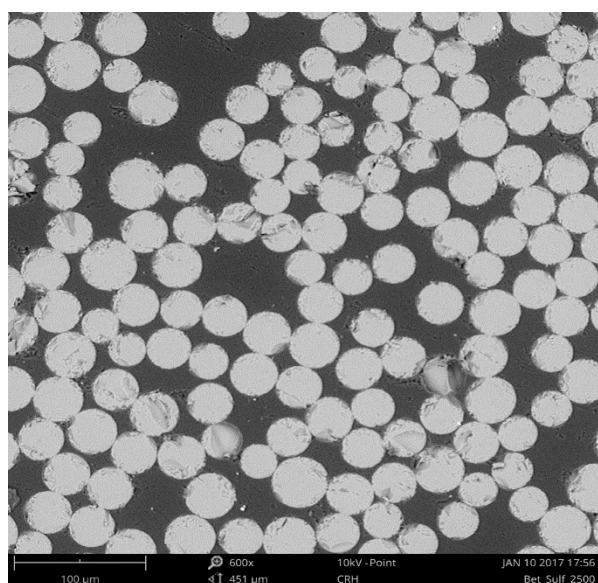
(a) Sem recobrimento, período de exposição de 8400 horas, centro da amostra; (b) Sem recobrimento, período de exposição de 8400 horas, periferia da amostra; (c) Recobrimento de calda, período de exposição de 5800 horas, centro da amostra; (d) Recobrimento de calda, período de exposição de 5800 horas, periferia da amostra; (e) Recobrimento de betão, período de exposição de 5800 horas, centro da amostra; (f) Recobrimento de betão, período de exposição de 5800 horas, periferia da amostra.

Figura G.1 – Imagens SEM de amostras de GFRP submersas no ambiente salino

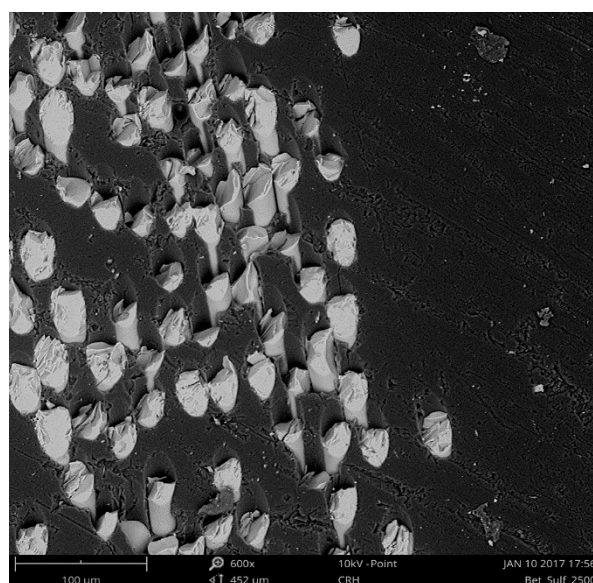


(a) Sem recobrimento, período de exposição de 8400 horas, centro da amostra; (b) Sem recobrimento, período de exposição de 8400 horas, periferia da amostra; (c) Recobrimento de calda, período de exposição de 5800 horas, centro da amostra; (d) Recobrimento de calda, período de exposição de 5800 horas, periferia da amostra

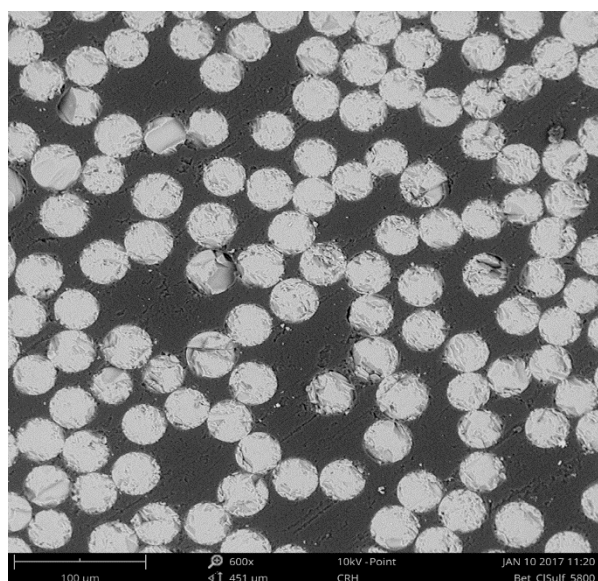
Figura G.2 – Imagens SEM de amostras de GFRP sem e com recobrimento de calda submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio



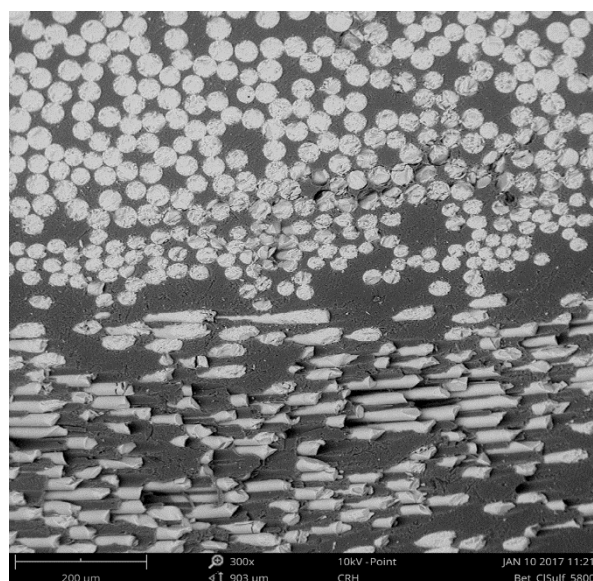
(a)



(b)



(c)



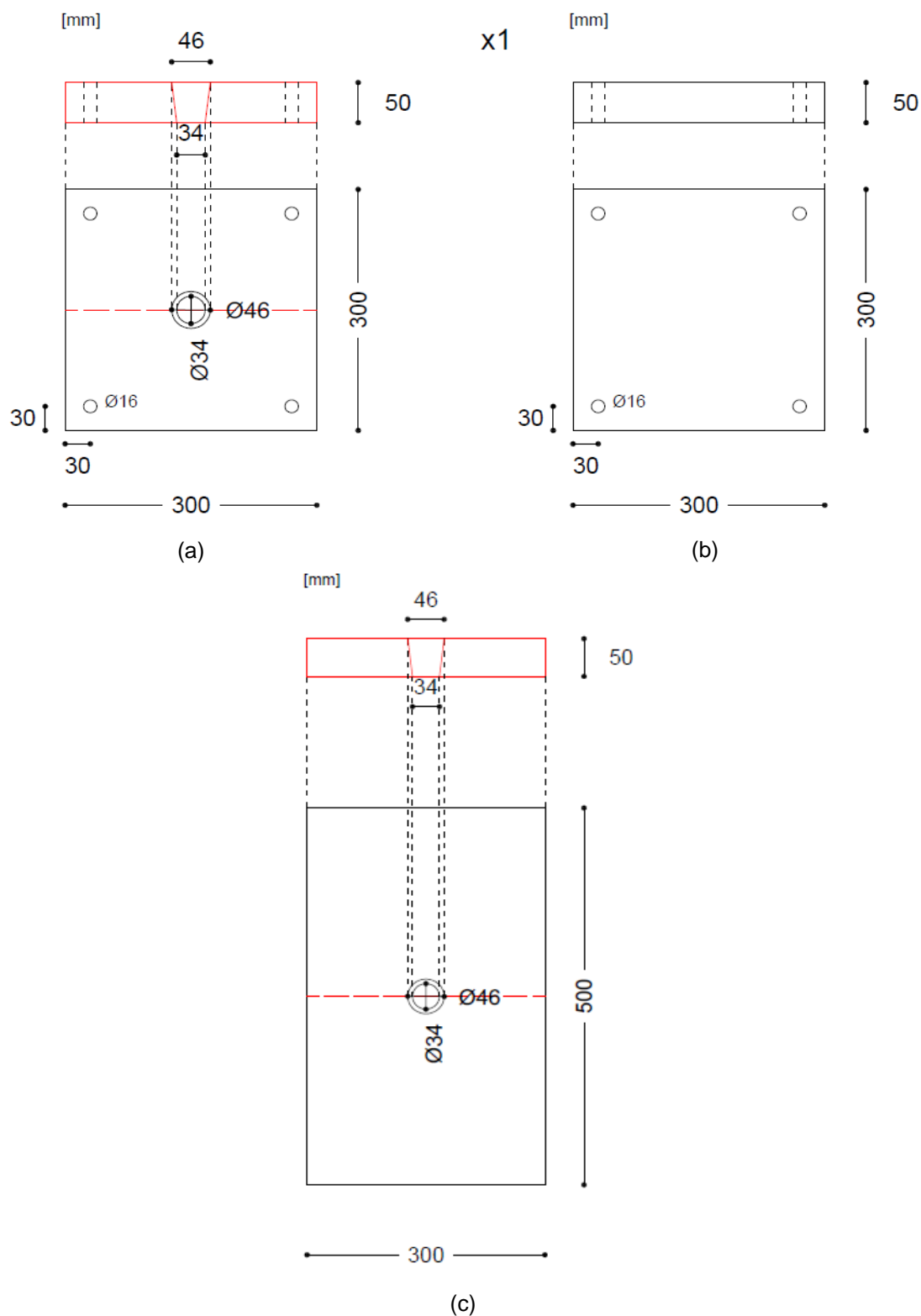
(d)

(a) Recobrimento de betão, período de exposição de 2500 horas, centro da amostra; (b) Recobrimento de betão, período de exposição de 2500 horas, periferia da amostra; (c) Recobrimento de betão, período de exposição de 5800 horas, centro da amostra; (d) Recobrimento de betão, período de exposição de 5800 horas, periferia da amostra

Figura G.3 – Imagens SEM de amostras de GFRP com recobrimento de betão submersas no ambiente de sulfatos e cloretos de sódio

Anexo H

Dimensionamento de placas e cunhas para sistema porticado



(a) Placa quadrada com furo central; (b) Placa quadrada; (c) Placa retangular com furo central.

Figura H.1 – Placas de metal dimensionadas para sistema porticado

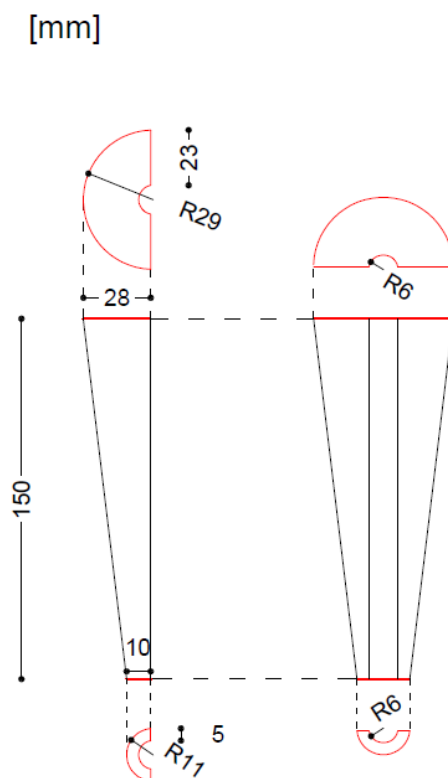


Figura H.2 – Cunhas metálicas dimensionadas para sistema porticado

Instruções de utilização do equipamento Wolpert

<p style="text-align: center; margin: 0;"> INSTITUTO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA INDUSTRIAL <small>INSTITUTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO</small> Laboratório de Caracterização de Materiais </p>	<p>IF 05/LCM pág. 1 de 4</p> <p>Ed.2 Março 98</p>
<p>INSTRUÇÕES DE UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTO</p> <p>MÁQUINA DE CHOQUE OTTO WOLPERT PW 30/15 (PC-1) FUNCIONAMENTO, MANUTENÇÃO E VERIFICAÇÃO</p>	
<p>ÍNDICE</p>	
	<p>PAG.</p>
<p>A - FUNCIONAMENTO.....</p>	<p>2</p>
<p>1 - COLOCAÇÃO DE MASSAS.....</p>	<p>2</p>
<p>2 - MOVIMENTAÇÃO DO PÊNDULO.....</p>	<p>2</p>
<p>3 - POSICIONAMENTO DO PONTEIRO DE ARRASTO.....</p>	<p>2</p>
<p>4 - POSICIONAMENTO DO PROVETE.....</p>	<p>3</p>
<p>5 - SEGURANÇA.....</p>	<p>3</p>
<p>B - MANUTENÇÃO.....</p>	<p>3</p>
<p>C - VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE</p>	<p>3</p>

ELABORADO:	REVISTO:	APROVADO:
------------	----------	-----------

INSTITUTO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA INDUSTRIAL
INSTITUTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO
Laboratório de Caracterização de Materiais

IF 05/LCM
pág. 2 de 4

Ed.2
Março 98

A - FUNCIONAMENTO

1 - COLOCAÇÃO DE MASSAS

- 1 - **Energia Nominal de 15 Kgm**, se necessário, retirar as massas (9 , fig.1) fazendo-as rodar em sentidos opostos.
- 2 - **Energia Nominal de 30 Kgm**, se necessário, colocar as massas apertando-as em sentidos opostos.

2 - MOVIMENTAÇÃO DO PÊNDULO

2.1 - Deslocamento

- 1 - Engatar o cutelo (15) no braço (2) pressionando a haste (10) contra o braço.
- 2 - Rodar o volante (1) no sentido dos ponteiros do relógio, para subida, e no sentido inverso para descida

2.2 - Posicionamento no fim de escala

- Fazer rodar o volante com o pêndulo engatado, até que o ponteiro principal (3), solidário com o braço (2), coincida com o traço de referência de fim de escala no mostrador (4).

2.3 - Libertação do pêndulo

- Accionar o manipulo de desengate (13) após destravamento do botão de segurança.

3 - POSICIONAMENTO DO PONTEIRO DE ARRASTO

- Premir o botão (11) de modo a engatá-lo no picleto do ponteiro de arrasto (12), rodando-o no sentido desejado.

ELABORADO:

REVISTO:

APROVADO:

INSTITUTO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA INDUSTRIAL
INSTITUTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO
Laboratório de Caracterização de Materiais

IF 05/LCM
pág. 3 de 4

Ed.2
Março 98

4 - POSICIONAMENTO DO PROVETE

- 1 - Colocar o provete nos suportes (6) contra os apoios (7) e com o entalhe do lado destes.
- 2 - Rodar o manipulador do dispositivo de centragem (8) fazendo-o coincidir com o entalhe do provete, conjugando a rotação deste dispositivo com o deslocamento normal do provete no suporte.

NOTA - Assegurar que o provete se mantém bem encostado aos apoios

5 - SEGURANÇA

- Colocar as grades de protecção de modo a isolar a área de movimentação do pêndulo antes de o libertar.

NOTA: - Estas grades também restringem a projecção dos provetes após o choque e facilitam a sua recolha.

B - MANUTENÇÃO

- No final de cada sequência de ensaios proceder à limpeza dos apoios.
- Em intervalos máximos de um semestre, se não for utilizado, fazer oscilar o pêndulo a partir do fim de escala.
- Anualmente proceder à limpeza e lubrificação do sistema de engrenagem, do volante e respectivo copo de lubrificação.
- Sempre que o equipamento não estiver em funcionamento, mantê-lo tapado.

C - VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE

A verificação da conformidade periódica, em princípio, é feita a intervalos máximos de um ano, de acordo com o Plano da Qualidade de Verificação PQ V5/LCM- Verificação da Conformidade da Máquina de Choque (PC-1).

INSTITUTO NACIONAL DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA INDUSTRIAL
INSTITUTO DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO
Laboratório de Caracterização de Materiais

IF 05/LCM
pág. 4 de 4

Ed.2
Março 98

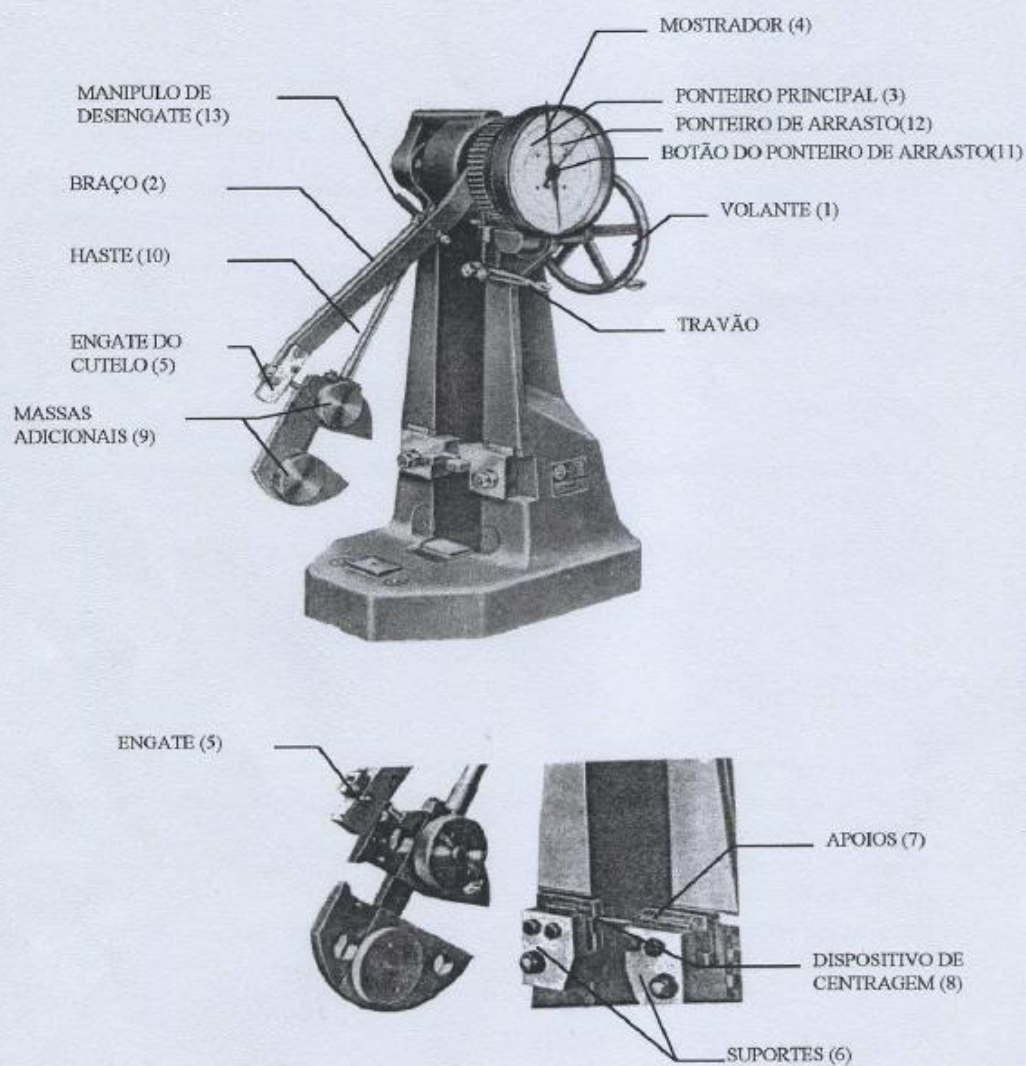


Fig 1.-Pêndulo e seus componentes

ELABORADO:

REVISTO:

APROVADO: